

**Fiber used in a high performance laser comprises a fiber core, a molded hexagon or other polygon casing surrounding the core, and a coating surrounding the casing**

**Patent number:** DE10211352

**Publication date:** 2002-09-26

**Inventor:** HARTER DONALD J (US), FERMANN MARTIN E (US)

**Applicant:** IMRA AMERICA INC (US)

**Classification:**


- international: H01S3/067

- european: H01S3/067C

**Application number:** DE20021011352 20020314

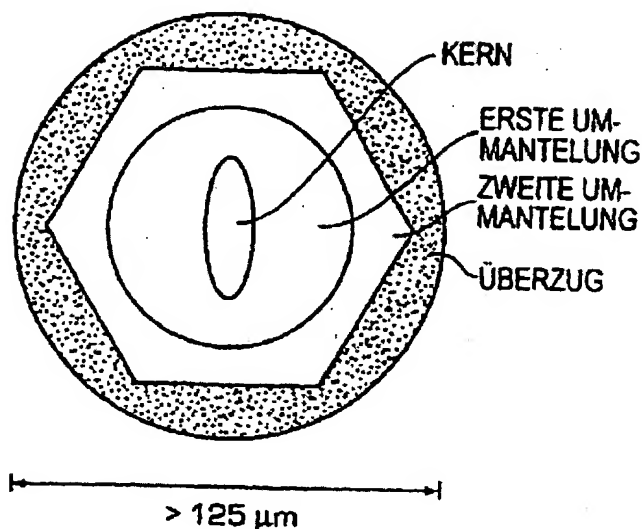
**Priority number(s):** US20010809248 20010316

**Also published as:**

 US2002172486 (A1)

#### Abstract of DE10211352

Fiber comprises a fiber core; a casing surrounding the core; and a coating surrounding the casing. The casing has a cross-sectional shape in the form of a molded hexagon or a polygon with  $(2n-1)$  sides (where  $n$  is more than 2). A fiber comprises a fiber core, a casing surrounding the core, and a coating surrounding the casing. The casing has a cross-sectional shape in the form of a molded hexagon or a polygon with  $(2n-1)$  sides (where  $n$  is more than 2). Preferred Features: The core is elliptical and has a double refraction of  $1 \times 10^{-6}$  to  $1 \times 10^{-4}$ . The outer diameter of the fiber is at least  $125 \mu\text{m}$ . The coating is made from a polymer. The fiber core is doped with Yb, Nd, Er, Er/Yb or Tm.



Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 102 11 352 A 1**

⑤1 Int. Cl. 7:  
H 01 S 3/067

②1 Aktenzeichen: 102 11 352.1  
②2 Anmeldetag: 14. 3. 2002  
④3 Offenlegungstag: 26. 9. 2002

DE 102 11 352 A 1

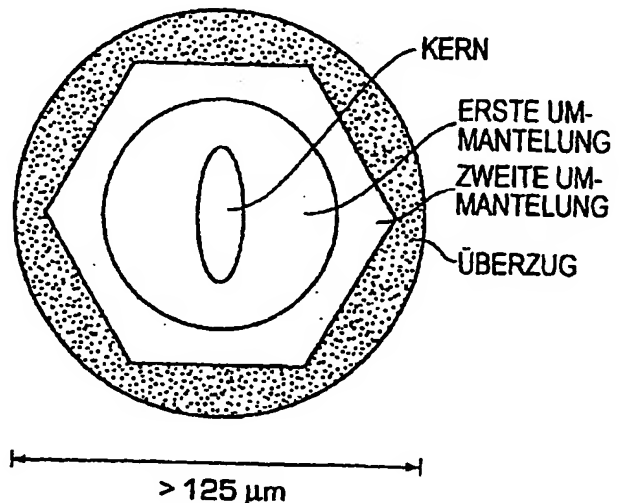
③0 Unionspriorität:  
809248 16. 03. 2001, US  
⑦1 Anmelder:  
IMRA America, Inc., Ann Arbor, Mich., US  
⑦4 Vertreter:  
Tiedtke, Bühling, Kinne & Partner GbR, 80336  
München

⑦2 Erfinder:  
Fermann, Martin E., Franklin, Mass., US; Harter,  
Donald J., Ann Arbor, Mich., US

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤4 Einfachpolarisations-Hochleistungsfaserlaser und -verstärker

⑤7 Bereitgestellt wird eine neue optische Polarisationshaltefaser, die als ein Hochleistungs-Polarisationshaltefaserlaser oder -verstärker verwendet werden kann. Eine Unempfindlichkeit des Polarisationszustands hinsichtlich einer externen Faserbiegung und Temperaturänderungen wird erzielt, indem eine Polarisationsmodenkopplung über eine Reduzierung von Beanspruchungen in dem Faserkern durch eine Erhöhung des Faserdurchmessers minimiert wird. Alternativ kann die Polarisationsmodenkopplung durch eine Optimierung des Faserüberzugs zur Minimierung von Beanspruchungen an der Grenzfläche zwischen der Faser und der Ummantelung minimiert sein. Folglich wird eine Unempfindlichkeit hinsichtlich einer Polarisationsmodenkopplung bei stark verringerten Werten einer Doppelbrechung im Vergleich zu Fasern mit einem kleinen Durchmesser erlangt. Die Faser ist von bedeutendem Nutzen in jeder Anwendung, in der die Polarisationsstabilität bedeutend ist, und wird in Telekommunikationsanwendungen insbesondere zur Verringerung der Polarisationsmodendispersion nützlich sein. Eine Ausführung eines einen parabelförmigen Impuls erzeugenden Faserlasers ist ebenso als ein bestimmtes Hochleistungsbeispiel beschrieben.



DE 102 11 352 A 1

- [0001] Die Erfindung betrifft optische Einfachpolarisationsfasern, das heißt optische Fasern, die mit einer starken Polarisationshaltequalität oder Polarisationsaufrechterhaltungsqualität ausgestattet sind, und Faserlaser, die aus Selten-Erd-Dotierungsmaterialversionen derselben ausgebildet sind.
- [0002] Die Entwicklung fortgeschrittener optischer Technologie über die vergangenen Jahre hat die Realisierung von Faserlasern als allgemeinen Ersatz von konventionellen Festkörperlasern stark vorangebracht. Im Vergleich zu Festkörperlasern bieten Faserlaser ein einmaliges Potential zur Integration und Miniaturisierung ohne jeden Kompromiss hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit, wobei sie die Implementierung von komplexen Laserverarbeitungsfunktionen in realen Anwendungen ermöglichen, die vorher für Festkörperlaser nicht möglich waren.
- [0003] Einer der bedeutendsten Aspekte dieser Fortschritte war die Umsetzung von Ausführungen von Doppelmantelfaserverstärkern, die ermöglichen, dass die Faserlaser durch Diodenlaser über einen weiten Leistungseinstellungsbereich gepumpt werden können, die im Dauerstrichbetrieb Faserlaserausgabeleistungen bis in dem Bereich von 100 W bereitstellen (vergleiche V. Dominic et al. "110 W fiber laser", Konferenz für Laser und Elektrooptik, CLEO, 1999, Dokument, CPD11).
- [0004] Diese hohen Ausgangsleistungen sind bisher jedoch nur mit randomisiert polarisierten Ausgangsstrahlen erreicht worden, was einen Gegensatz zu Festkörperlasern darstellt, wo die Erzeugung von Ausgangsstrahlen mit einem wohldefinierten Polarisationszustand keine ernsthafte Schwierigkeit darstellt. Für Faserlaser oder insbesondere für Doppelmantelfaserlaser ist es klar, dass zum vollständigen Ersatz der Festkörperlaser die Konstruktion der Faserlaser mit einem steuerbaren Polarisationsausgangszustand gewünscht ist.
- [0005] Bisher sind mehrere Verfahren zur Ermöglichung von wohldefinierten Polarisationszuständen vorgeschlagen worden, die von Doppelmantelfasern zu erzeugen sind. In einer Arbeit wurde die Verwendung von hochdoppelbrechenden Verstärkerfasern über die Verwendung von elliptischen Faserkernen oder die Aufnahme von beanspruchungserzeugenden Bereichen in die Faserummantelung vorgeschlagen (vergleiche M. E. Fermann et al., "Single-mode amplifiers and compressors", US Patent Nr. 5,818,630; M. E. Fermann et al., "Technique for mode-locking of multimode fibers and the construction of compact high power fiber laser pulse sources", USAN (US-Anmeldenummer) 09/199,728, eingereicht am 25. November 1998). Die Aufnahme von beanspruchungserzeugenden Bereichen in Doppelmantelfasern ist später gemäß dem US Patent Nr. 5,949,491 durch DiGiovanni wieder aufgenommen worden. DiGiovanni legt jedoch die Verwendung von nicht-kreisförmigen beanspruchungserzeugenden Bereichen in einer asymmetrisch geformten Außenummantelung fest. Nicht-kreisförmige beanspruchungserzeugende Bereiche sind im Allgemeinen schwer herzustellen und eine asymmetrische Ummantelungsform beeinträchtigt die Möglichkeit der Teilung derartiger Fasern und die Möglichkeit derartige Fasern mit weiteren kreisförmigen Fasern zu Spleißen beziehungsweise zu verbinden stark.
- [0006] In jüngster Zeit ist ein polarisationshaltender Faserverstärker durch Kliner et al. gezeigt worden (D. A. V. Kliner et al., "Polarization maintaining amplifier employing double-clad bow-tie fiber", Opt. Lett., Vol. 26, pp. 184-186 (2001)). In einer weiteren Arbeit von Kliner et al. wurde eine bestimmte Ausführung des Ausführungsvorschlags durch Fermann et al. in dem US Patent Nr. 5,818,630 diskutiert. Kliner et al. führten eine Faser mit einem Ummantelungsdurchmesser von 150 µm aus, wobei die beanspruchungserzeugenden Bereiche sich über einen Innendurchmesser von 20 µm erstreckten, was impliziert, dass die beanspruchungserzeugenden Bereiche sehr nahe an dem Kern zur Maximierung der Faserdoppelbrechung vorgesehen waren. In dieser Arbeit war eine Doppelbrechung von  $1,2 \times 10^{-4}$  (entsprechend einer Schwebungslänge von 8 mm bei einer Wellenlänge von 1000 nm) erforderlich, um einen Polarisationshaltebetrieb zu erlangen. Darüber hinaus waren nur zwei beanspruchungserzeugende Bereiche in der Ummantelung beinhaltet und die Doppelmantelfaser beinhaltete nur eine kreisförmige Glasfaserummantelung und eine kreisförmige Polymerummantelung.
- [0007] Die Verwendung von derartigen beanspruchungserzeugenden Bereichen, wie sie durch Kliner et al. diskutiert wurden, in Doppelmantelfasern ist jedoch problematisch, da die erhöhte Komplexität der Faservorform und die Tendenz zum Splittern von hochbeanspruchten Vorformen vorhanden ist, immer wenn die maschinelle Bearbeitung der Vorformfläche erforderlich ist. Die rechteckförmige Ummantelung, die zur Maximierung der Absorption verwendet wird, entspricht einem Beispiel hierzu (vergleiche Snitzer et al. "Optical fiber lasers and amplifiers", US Patent Nr. 4,815,079).
- [0008] Beanspruchungserzeugende Bereiche können jedoch den vorteilhaften Effekt der Störung der in der Ummantelung fortschreitenden Moden haben, was zu einer erhöhten Pumpabsorption führt.
- [0009] Nachfolgend werden die in der Ummantelung fortschreitenden Moden als Pumpmoden bezeichnet. Um die Modenstörung der Pumpmoden zu maximieren und die Pumpabsorption zu optimieren, sind beanspruchungserzeugende Bereiche nahe dem äußeren Durchmesser der Faser optimal. Weiterhin erzeugen beanspruchungserzeugende Bereiche entfernt von dem Faserkern ein geringeres Maß an Doppelbrechung und verringern die Polarisationshaltefähigkeit der Faser. Allgemein sind die Anforderungen hinsichtlich einer optimalen Pumpmodenstörung und einer optimalen Polarisationsaufrechterhaltung unterschiedlich und ist eine Technik zur Erlangung einer guten Polarisationserhaltung bei Vorhandensein einer optimalen Pumpmodenstörung nicht beschrieben worden.
- [0010] In gleichartiger Weise erzeugt die Verwendung eines elliptischen Kerns im Allgemeinen nicht immer eine ausreichende Doppelbrechung zur Bereitstellung eines stabilen Polarisationszustands. Darüber hinaus fällt das Doppelbrechungsmaß, das durch die Verwendung eines elliptischen Faserkerns induziert wird, mit dem Anstieg der Grundmodengröße, wohingegen eine große Grundmodengröße für Hochleistungsanwendungen bevorzugt wird.
- [0011] In einem weiteren Vorschlag sind asymmetrische Lufthohlräume zur Erlangung eines Polarisationshalteeffekts verwendet worden (A. Ortigossa et al., "Highly birefringent photonic crystal fibers", Opt. Lett., 25, 1325-1327 (2000)). Diese Ausführungen wurden allerdings nur mit Bezug auf einen Faseraußendurchmesser von 63 µm verwendet. Folglich war eine Polarisationschwebungslänge < 1 mm bei einer Wellenlänge von 1,54 µm zur Erlangung eines stabilen Polarisationsbetriebs erforderlich. Es wurde keine Optimierung des Faseraußendurchmessers oder der Faserbeschichtung oder der Verwendung derartiger Fasern als Polarisationshaltefaserverstärker beschrieben.
- [0012] Als ein alternativer Vorschlag zur Erzeugung einer stabilen Polarisationsausgabe wurde die Verwendung einer

gesteuerten Spulung der Faser auf eine kleine Trommel vorgeschlagen (M. E. Fermann et al., "Integrated passively modelocked fiber lasers and method for constructing the same", US Patent Nr. 6,072,811; Koplow et al. "Polarization maintaining double-clad fiber amplifier employing eternally applied stress-induced birefringence", Opt. Lett., vol. 25, pp. 387 (2000)). Eine feste Spulung ist ebenso problematisch, da sie die Lebensdauer der Faser reduziert. Aufgrund der Lebensdauerbelange ist eine gesteuerte Biegung auf Fasern mit kleinen Außendurchmessern (ungefähr  $< 200 \mu\text{m}$ ) beschränkt. Es ist klar, dass fest gespulte Fasern eine Fasersignalübergabe über eine Faserleitung einer ausgedehnten Länge nicht ermöglichen. Um darüber hinaus wirkliche Hochleistungsfaserlaser zu erzeugen, ist die Verwendung von Fasern mit größeren Durchmessern klar ein Vorteil, da sie die Kopplung einer erhöhten Pumpenleistung von Halbleiterlasern in die Faser ermöglicht.

[0013] Zur Vereinfachung einer Modensteuerung in dem Faserkern und zur Verringerung einer Modenkopplung in dem Kern von optischen Fasern ist bereits die Verwendung von Fasern mit großen Außendurchmessern vorgeschlagen worden (M. E. Fermann und D. Harter, "Single-mode amplifiers and compressors based on multimode optical fibers", US Patent Nr. 5,818,630). Eine Begrenzung dieses Vorschlags besteht darin, dass die Grenze für typische Faserlaser und verstärker direkt proportional zu der Pumpenintensität beziehungsweise Pumpenstärke ist. Somit bedeutet allgemein ein größerer Faseraußendurchmesser eine höhere Schwelle für den fraglichen Faserverstärker oder Laser, welche in Frage kommen, und einen weniger effizienten Betrieb.

[0014] Ein alternatives vorgeschlagenes Verfahren zur Verringerung einer Modenkopplung in dem Phasenkern besteht darin, zwei Typen von Überzügen auszuführen. Der erste Überzug, der die Glasfläche der Faser umgibt, war als weicher Überzug mit einem entsprechend verringerten Elastizitätsmodus und einer kleinen Querdehnungsziffer vorgeschlagen. Ein zweiter harter Überzug war zum Schutz der Faser von außen vorgeschlagen, wobei der zweite Überzug einen erhöhten Elastizitätsmodus und eine große Querdehnungsziffer hatte (S. T. Shiue, "Design of double-coated optical fibers to minimize long-term hydrostatic pressure-induced microbending losses", Opt. Lett., 26, 128-130 (2001)). Es wurde jedoch eine Selten-Erd-Dotierung für derartige Fasern nicht in Erwägung gezogen, darüber hinaus wurden keine Überzugsausführungen zur Optimierung der Polarisationshaltefähigkeit der Fasern gegeben.

[0015] Allgemein schlägt keine der vorstehenden Verfahren ein Verfahren zur Minimierung des Maßes einer Polarisationsmodenkopplung in einer Doppelbrechungsfasern vor. Bisher war als einzige Technik zur Reduzierung des Maßes einer Polarisationsmodenkopplung in einer Doppelbrechungsfasern die Maximierung der Faserdoppelbrechung verfügbar. Im Gegensatz dazu wird hier die Verwendung eines großen Faserdurchmessers oder eines optimierten Faserüberzugs zur Reduzierung des Maßes einer Polarisationsmodenkopplung und einer Polarisationsmodenstreuung und zur Erhöhung der Polarisationshaltefähigkeit von optischen Fasern mit geringen Doppelbrechungswerten offenbart. Darüber hinaus wird eine Verbesserung der Effizienz eines Verstärkers oder Lasers mit einer Faser mit Polarisationshalte-eigenschaft und einem großen Außendurchmesser durch die Hinzufügung einer äußeren Glasummantelung zu einer relativ kleineren kreisförmigen Innenummantelung offenbart, so dass das Pumpenlicht in der inneren Ummantelung geführt wird, während die große äußere Ummantelung eine Verringerung einer Modenkopplung in dem Faserkern sicherstellt. Eine gleichartige Verbesserung hinsichtlich der Effizienz einer optischen Polarisationshaltefaser kann durch Verwendung eines relativ kleinen Faserummantelungsdurchmessers in Verbindung mit optimierten Faserüberzügen erlangt werden.

[0016] Zur Minimierung der Nichtlinearität von Hochleistungsfaserverstärkern ist die Verwendung von Mehrmodenfaserverstärkern vorgeschlagen worden (vergleiche US Patent Nr. 5,818,630 und US Patent Nr. 5,880,877 bezüglich M. E. Fermann et al.). In diesen beiden Patenten ist die Verwendung einer Polarisationshaltefaser und einer Doppelmantelfaser vorgeschlagen worden. In dem Patent Nr. 5,880,877 ist die Verwendung einer den Faserkern umgebenden inneren Ummantelung vorgeschlagen worden. Diese Patente haben jedoch nicht ein Verfahren zur Minimierung der Nichtlinearität von Hochleistungsfaserverstärkern durch Steuerung der Ummantelungsform vorgeschlagen.

[0017] Ummantelungsformen werden allgemein zur Erzeugung eines einheitlichen Pumpabsorptionskoeffizienten entlang der Faserlänge optimiert (vergleiche Snitzer et al., in US Patent Nr. 4,815,079; Martin H. Muendel et al., US Patent Nr. 5,533,163; D. J. DiGiovanni et al., US Patent Nr. 5,966,491 und S. Grubb et al., US Patent Nr. 6,157,763). Gemäß Snitzer et al. war eine rechtwinklige Ummantelung mit einem Einmodenkern vorgeschlagen worden, gemäß Muendel et al. ist ein Polygon mit einer Abdeckung einer Fläche für eine Ummantelungsform vorgeschlagen worden, und gemäß Grubb et al. stellen zwei senkrechte Flächen an der Außenfläche der inneren Faserummantelung eine einheitliche Pumpabsorption bereit. Gemäß D. J. DiGiovanni et al. stellt eine dreifache Ummantelung eine einheitliche Pumpabsorption bereit, wobei die erste Ummantelung eine asymmetrische Form aufweist, die zweite Ummantelung rund ist und das dritte Ummantelungsmaterial ein Polymerüberzugsmaterial ist.

[0018] Darüber hinaus schlägt DiGiovanni ebenso die Aufnahme von nicht-kreisförmigen beanspruchungserzeugenden Bereichen in die erste Ummantelung vor.

[0019] Keine dieser Patentschriften schlägt die Verwendung von symmetrischen Ummantelungsformen wie etwa eines Fünfecks, eines Siebenecks oder eines deformierten Sechsecks zur Optimierung der Pumpabsorption in der Ummantelung oder zur Ermöglichung eines direkten bzw. geraden Spleißvorgangs derartiger Fasern vor. Darüber hinaus schlägt DiGiovanni die Verwendung von kreisförmigen beanspruchungserzeugenden Bereichen in einer Ummantelung nicht vor.

[0020] Darüber hinaus stellt keine dieser als Bezug angeführten Patente eine kreisförmige innere Ummantelung zur Bereitstellung eines nicht-einheitlichen Pumpabsorptionskoeffizienten vor. Gleichfalls schlägt keine dieser Patentschriften einen Mehrmodenkern mit einer kreisförmigen inneren Ummantelung zur Bereitstellung einer nicht-einheitlichen Pumpabsorption vor.

[0021] Im Gebiet von modengekoppelten Faserlasern sind mehrere Techniken zur Erlangung eines stabilen Betriebs bei Vorhandensein von Abschnitten einer stark doppelbrechenden Faser vorgeschlagen worden. In einem Vorschlag ist die Einführung eines polarisationsabhängigen Verlustes zur Erlangung eines zuverlässigen Betriebs entlang einer Polarisationsachse vorgeschlagen worden (M. E. Fermann et al., US Patent Nr. 5,627,848; vergleiche auch H. Lin et al., US Patent Nr. 6,097,741 mit gleichartiger Lehre; ebenso M. E. Fermann et al., US Patent Nr. 6,072,811). In dem US Patent Nr. 5,627,848 ist ebenso die Verwendung von Wellenlängenabstimmelementen wie etwa Filtern oder großen Gittern vor-

- geschlagen worden. Es sind jedoch in diesen als Bezug verwendete Patente keine Faserausführungen offenbart worden, die einen stabilen Betrieb von modengekoppelten Lasern mit Faserabschnitten einer Faser mittlerer Doppelbrechung ermöglichen. Gemäß dem Patent Nr. 6,072,811 bezüglich Fermann wurde vorgeschlagen, dass ein stabiler phasen- bzw. modengekoppelter Betrieb stark doppelbrechende Faserabschnitte mit einer Polarisationssschwebungsmenge (polarization beat length)  $< 10$  cm bei einer Wellenlänge von  $1,55 \mu\text{m}$  erfordert. In dem darin diskutierten Beispiel wurde eine Schwebungslänge von  $< 4$  mm bei einer Wellenlänge von  $1,55 \mu\text{m}$  zur Erlangung eines stabilen Polarisationsbetriebs verwendet. Ferner erwähnt keine der drei vorstehend angeführten Patentschriften Ausführungen von bestimmten sättigbaren Absorbern, die eine Impulsstabilität in einem Faserlaser mit mehreren Abschnitten einer stark doppelbrechenden Faser bereitstellen.
- 10 [0022] Für modengekoppelte Faserlaser sind in gleichartiger Weise mehrere Verfahren bzw. Techniken zur Erhöhung der erzielbaren Ausgangsleistung vorgeschlagen worden. Die Verwendung von Fasern mit unterschiedlichen Werten der Streuung ist in Verbindung mit einem (nicht wünschenswerten) hinsichtlich einer Polarisation stark empfindlichen Resonator vorgeschlagen worden (Tamura et al., "Stretched pulse fiber laser", US Patent Nr. 5,513,194). Eine weitere Technik schlägt die Verwendung von Stark-Chirp-Faser-Gittern zum Betrieb des Systems mit hohen Werten einer negativen (soliton-unterstützten) Streuung vor (vergleiche M. E. Fermann et al., "Technique for the generation of high power optical pulses in modelocked lasers by dispersive control of the oscillation pulse width", US Patent No. 5,450,427). Der Nachteil der Verwendung von Stark-Chirp-Faser-Gittern besteht darin, dass die erzeugte Impulslänge proportional mit der Wurzel der gesamten induzierten negativen Streuung ansteigt, was allerdings bei der Einführung kürzest möglichen Impulse nicht hilft.
- 15 [0023] Schließlich bezieht sich ein weiteres Verfahren auf die Verwendung von Mehrmodenfasern (M. E. Fermann USAN 09/199,728, eingereicht am 25. November 1998) für eine Erhöhung hinsichtlich einer Grundmodengröße und eines Anstiegs einer möglichen Oszillatorleistungsausgabe. Jedoch wurde in dieser Verbindung die Verwendung einer nicht einheitlichen Pumpabsorption nicht vorgeschlagen. Darüber hinaus wurde keine Ausführung eines bestimmten sättigbaren Absorbers zur Optimierung der Stabilität eines derartigen Lasers vorgeschlagen und es wurde keine bestimmte Ausführung einer Faser zur Optimierung der Laserstabilität bei Fehlen von polarisationskompensierenden Elementen vorgeschlagen.
- 20 [0024] Darüber hinaus sind alle bisher gezeigten modenkoppelnden Techniken (Fermann et al., 6,072,811; Lin et al., 6,097,741; Tamura et al., 5,513,194; Fermann et al., 5,450,427; Fermann et al., USAN 09/199,728), um nur wenige Beispiele zu benennen, insofern beschränkt, als sie nur ein maximales Maß an Eigen- bzw. Selbstphasenmodulation (self-phase modulation) um  $\pi$  in dem Resonator ermöglichen. Da das Maß einer Eigenphasenmodulation in einem Laserresonator direkt proportional zu der Spitzenleistung der erzeugten optischen Impulse ist, ist das geringe Maß an tolerierbarer Eigen- bzw. Selbstphasenmodulation klar ein begrenzender Faktor. Ein weiteres gemeinsames Merkmal derartiger Lasersysteme besteht in Folge des geringen Maßes an der Eigenphasenmodulation darin, dass die spektrale Schwingungsimpulsbandbreite geringer als die Bandbreite jedes resonatorinternen optischen Filters ist (K. Tamura et al., "Optimization of filtering in soliton fiber lasers", IEEE Photonics Techn. Lett., 6, 1433-1435, (1994)). Es sind keine Ausführungen hinsichtlich bestimmten sättigbaren Absorbern vorgeschlagen worden, die einen Betrieb des Lasers bei Vorhandensein eines großen Maßes an Eigenphasenmodulation ermöglicht, wenn die optische Impulsbandbreite größer als die Bandbreitenbegrenzung jeder resonatorinternen Optik ist.
- 30 [0025] Außerhalb des Gebiets von modengekoppelten Lasern ist die Verwendung von parabelförmigen Impulsen zur Erhöhung der verfügbaren Ausgangsleistung von Faserverstärkern vorgeschlagen worden (M. E. Fermann et al., "Modular, wavelength-tunable, high-energy ultrashort pulse fiber source", USAN 09/576,772, eingereicht am 23. Mai 2000). Die Verwendung von parabelförmigen Impulsen ist jedoch nicht für einen Faseroszillator vorgeschlagen worden, darüber hinaus ist bisher kein Verfahren zur effektiven Nutzung von parabelförmigen Impulsen zur Optimierung der Ausgangsleistung eines modengekoppelten Faseroszillators vorgeschlagen worden. Darüber hinaus ist nicht vorgeschlagen worden, dass parabelförmige Impulse die Konstruktion von modengekoppelten Faserlasern mit einem Maß an einer resonatorinternen Eigenphasenmodulation  $> \pi$  ermöglicht, woraus resultiert, dass die Bandbreite der optischen Ausgangsimpulse größer als die Bandbreitenbegrenzung jeder resonatorinternen Bandbreitenbegrenzungsoptik ist.
- 35 [0026] Erfindungsgemäß wird eine neue optische Polarisationshaltefaser durch eine Vielzahl von alternativen Techniken hergestellt. Gemäß einem Ausführungsbeispiel ist die Faser polarisationsunempfindlich gegenüber einer externen Biegung und einer Temperaturänderung durch Erhöhung des Faserdurchmessers zur Minimierung einer Polarisationsmodenkopplung durch die Verringerung einer Beanspruchung in dem Faserkern ausgeführt. Alternativ kann die Polarisationsmodenkopplung durch Verwendung bestimmter Ummantelungstechniken zur Minimierung von Belastungen der Faserumhüllungsgrenzfläche reduziert werden. Beanspruchungseinführende Techniken können in der Umhüllung zur Optimierung der Faserdoppelbrechung verwendet werden.
- 40 [0027] Selten-Erd-dotierte mehrfachummantelte Versionen derartiger polarisationshaltender Fasern sind als Hochleistungslaserquellen ideal, wobei sie ein effizientes Pumpen mit Hochleistungslaserdioden ermöglichen. Die Faserlaser können sowohl in einem Dauerstrichmodus als auch in einem gepulsten Modus arbeiten und signifikante Vorteile hinsichtlich der Ausführung der Faserlaser und -verstärker bieten, immer wenn Polarisationsstabilität ein Hauptanliegen ist. Besonders nützliche Anwendungen derartiger Fasern beinhalten Hochleistungs-Einfrequenz-Faserverstärker, gepulste Hochleistungsfaserverstärker oder modengekoppelte Faserlaser.
- 45 [0028] Die Nichtlinearität dieser Vorrichtungen kann minimiert werden, während gute Polarisationshalteeigenschaften durch Aufnahme einer den Faserkern umgebenden kreisförmigen inneren Ummantelung erhalten bleibt. Die innere Ummantelung liefert eine nicht-einheitliche Pumpabsorption entlang der Faserlänge in einer Konfiguration mit einem am Ende vorgesehenen pumpenden Verstärker, was eine große Pumpabsorption in einem ersten kurzen Abschnitt der Faser und eine verringerte Pumpabsorption in einem zweiten langen Abschnitt der Faser bereitstellt. Folglich ist die Verstärkung in dem ersten kurzen Faserabschnitt maximiert, wohingegen die Nichtlinearität der Faser minimiert ist. Die Wirksamkeit der nicht-einheitlichen Pumpabsorption kann ferner maximiert werden, indem dem zentralen Kern ermöglicht wird, dass er eine Vielzahl von Moden aufweist, was den Kerndurchmesser und den Durchmesser der inneren Umman-

telung erhöht, womit der Einfangteil für in die erste innere Ummantelung gekoppeltes Pumpenlicht erhöht wird.

[0029] Ein innerer Kern kann während eines Vorformherstellungsprozesses durch Hinzufügen eines erhöhten Anteils von Phosphor-, Germanium- oder Aluminiumdotierstoffen direkt anwachsen. Die kreisförmige innere Ummantelung kann aus einem Bereich mit einer verringerten Konzentration der Dotierung der Vorform ausgebildet sein. Ein zweiter nicht-dotierter Bereich der Vorform kann dann eine zweite äußere Ummantelung bilden. Die kreisförmige innere Ummantelung kann ebenso durch ein Überziehen (over-sleaving) der Vorform mit einem geeigneten Substratrohr hergestellt werden, das im Vergleich zu der inneren Ummantelung einen geringeren Brechungsindex aufweist. Das zusätzliche Substratrohr beinhaltet dann eine zweite äußere Ummantelung. Im Allgemeinen kann die Außenform der zweiten Ummantelung nicht kreisförmig oder nicht einheitlich sein, um für eine effiziente Gesamtabsorption des Pumpenlichts ausgeführt zu sein.

[0030] Eine effiziente Pumpabsorption kann ebenso erlangt werden, indem eine einzige nicht-kreisförmige Ummantelung in Verbindung mit einer äußeren Beschichtung ausgeführt wird, wobei der Brechungsindex der Beschichtung geringer als der Brechungsindex der Ummantelung ist. Im Einzelnen kann die nicht-kreisförmige Ummantelung einen äußeren Rand beziehungsweise einen Außenumfang aufweisen, der ein nicht diametral symmetrisches gleichseitiges Polygon bildet und beispielsweise ein Fünfeck oder ein Siebeneck darstellt. Alternativ kann die nicht-kreisförmige Ummantelung einen Außenumfang aufweisen, der ein nicht-diametral symmetrisches, nicht-gleichseitiges Polygon bildet, beispielsweise einschließlich einem Sechseck oder einem Achteck mit einer oder mehreren verkürzten Seiten.

[0031] Derartige Formen randomisieren die Reflexionen in der Ummantelung und unterstützen dadurch eine Modenmischung in der Ummantelung, während sie Reflexionen mit regelmäßigen periodischen Zeitabständen und Wegabständen nicht verstärken.

[0032] In dieser Ummantelungsstruktur können kreisförmige oder nicht-kreisförmige beanspruchungserzeugende Bereiche ferner in derartige Fasern eingebaut werden, um einen polarisationshaltenden Betrieb zu erlangen.

[0033] Im Falle von modengekoppelten Faserlasern kann ein polarisationsstabiler Betrieb in einer Faser mittlerer Doppelbrechung erlangt werden, das heißt in einem Bereich, in dem der Gruppengeschwindigkeitsunterschied bzw. -drift zwischen den zwei Polarisationsachsen der Faser gering ist im Vergleich zu der Impulsbreite, was die Impulsstabilität stark erhöht. Folglich können besonders kompakte, polarisationsunempfindliche, passiv modengekoppelte Faserlaser durch die Aufnahme von sättigbaren Absorbern in den Faserlaserresonator gebildet werden.

[0034] Ein polarisationsstabiler Betrieb von modengekoppelten Lasern kann ebenso in Resonatoren von Einfachpolarisationsfasern erlangt werden, die Abschnitte einer hochdoppelbrechenden Faser beinhalten, wo der Gruppengeschwindigkeitsunterschied zwischen den zwei Polarisationsachsen in einem jeden Faserabschnitt im Vergleich zu der Impulsbreite groß ist. In diesem Fall wird die Impulsstabilität sichergestellt, wenn die Hauptträgerlebensdauer des sättigbaren Absorbers geringer als der Gruppengeschwindigkeitszeitunterschied in einem jeden hochdoppelbrechenden Faserabschnitt ist.

[0035] Im Allgemeinen kann bei Vorhandensein von Streuungsreflexionen in einem passiv modengekoppelten Laserresonator die Impulsstabilität sichergestellt werden, wenn die Zeitverzögerung zwischen dem Hauptimpuls und dem durch die Streuungsreflexion erzeugten "Streuungsimpuls" größer als die Lebensdauer des resonatorinternen sättigbaren Absorbers ist. Im Falle eines passiv modengekoppelten Mehrmoden-Faserlasers wird eine Impulsstabilität erlangt, wenn die Zeitdauer hinsichtlich des Gruppengeschwindigkeitsunterschieds zwischen der Grundmode und der Mode mit der nächsthöheren Ordnung größer als die Lebensdauer des resonatorinternen sättigbaren Absorbers ist.

[0036] Weiterhin kann durch Verwendung von sättigbaren Absorbern, die zumindest eine mit der resonatorinternen Impulsbreite und einem resonatorinternen Filter vergleichbare Lebensdauer aufweisen, ein Hochleistungsbetrieb von passiv modengekoppelten Faserlasern mit Chirp-Impulsen erlangt werden.

[0037] Chirp-Impulse weisen eine verringerte Spitzenleistung und eine erhöhte zeitliche Länge auf. Am Ausgang des Faserlasers können die Impulse zeitlich auf die Bandbreitengrenze mit einer stark erhöhten Spitzenleistung und stark verringerter zeitlicher Breite bzw. Dauer zeitlich zurückkomprimiert werden. Eine Laserstabilität erfordert eine positive Streuung der resonatorinternen Faser und das resonatorinterne Filter sollte eine Bandbreite haben, die geringer als die Bandbreite des Verstärkungsmediums ist. Die Hauptlebensdauer des sättigbaren Absorbers muss kürzer sein als etwa das Fünffache der maximalen resonatorinternen Impulsbreite und der sättigbare Absorber muss zumindest zweifach über der Sättigung betrieben werden (die auf den sättigbaren Absorber auftreffende Impulsenergie muss zumindest zweifach so hoch wie die Sättigungsenergie des sättigbaren Absorbers sein). Die stabile Oszillation der zurückkomprimierten Chirp-Impulse in einem derartigen Laser ist durch einen großen Wert einer resonatorinternen Eigenphasenmodulation gekennzeichnet, die leicht  $\pi$  übersteigt. Folglich übersteigt die optische Bandbreite der erzeugten Impulse die Bandbreite des resonatorinternen Filters. Die resonatorinterne Impulsform kann daher einer Solitonform oder einer Gaussform nicht angenähert werden, sondern ähnelt eher einer Parabel, oder allgemein ausgedrückt einem Impuls mit stark verringerten Impulsausläufern im Vergleich zu einem Gaussimpuls. Die Resonatorausführung ist verträglich mit Ausführungen einer Modenkopplungsfaser mit einer mittleren Doppelbrechung und geringer Polarisation und der Verwendung von Mehrmodenfasern zur weiteren Erhöhung der Ausgangsleistung.

[0038] Die Erfindung betrifft eine neue optische Polarisationshaltefaser. In dieser Faser sind eine Polarisationsmodenkopplung und eine Polarisationsmodendispersion durch eine Zahl von Techniken minimiert, insbesondere durch Verringerung von Faserkernbeanspruchungen über einen Anstieg des Faserdurchmessers. Folglich werden ein viel kleiner Grad an Modenkopplung und Modendispersion im Vergleich zu Fasern mit kleinen Durchmesser erlangt. Allgemein können beanspruchungserzeugende Bereiche in derartige Fasern zur Optimierung ihres Polarisationshaltebetriebs eingefügt werden. Die beanspruchungserzeugenden Bereiche können eine kreisförmige Form aufweisen.

[0039] Durch eine Selten-Erdmaterial-Dotierung derartiger Fasern können gut polarisierte Hochleistungsfaserlaser- und -verstärker ohne Polarisationskompensationselemente aufgebaut werden. Der Laser- oder Verstärkerschwellenwert und die Effizienz derartiger Faserlaser kann durch eine Verwendung eines kleinen Innenummantelungsdurchmessers in Verbindung mit zumindest einer "weichen" und einer "harten" Ummantelungsschicht optimiert werden, wobei die erste Ummantelung "weich" ist und die zweite "harte" Ummantelung einen größeren Durchmesser aufweist.



[0040] Der Laser- oder Verstärkergrenzwert kann ebenso durch Anwendung nicht kreisförmiger, symmetrischer Ummantelungsformen minimiert werden, die eine Ebene nicht abdeckt (tile a plane), wie etwa ein Fünfeck, ein Siebeneck oder ein deformiertes Sechseck.

[0041] Es ist sowohl ein Dauerstrich, ein impulsförmiger oder modengekoppelter Betrieb derartiger Faserlaser und -verstärker möglich. Die Nichtlinearität derartiger Faserlaser kann durch die Bereitstellung einer nicht einheitlichen Pumpabsorption minimiert werden, indem eine dem Faserkern umgebende kleine kreisförmige innere Ummantelung hinzugefügt wird. Die verringerte Absorption helikaler bzw. spiralförmiger Strahlen in einer derartigen Ummantelungsstruktur liefert eine Verringerung der Pumpabsorption entlang der Faserlänge. Folglich wird eine große Verstärkung nur in einem kurzen Abschnitt der Faser mit einer hohen Pumpabsorption erzielt. Die Gesamteffizienz der Vorrichtung kann durch Begrenzung der Größe der inneren Ummantelung bezüglich der Faserkerngröße hergestellt werden. Ein großes

Maß an Pumpenlicht kann in die innere Ummantelung gekoppelt werden, wenn ein Mehrmodenkern verwendet wird. [0042] Arbeiten Faserlaser in einem modengekoppelten Modus, kann ein polarisationsstabiler Betrieb in einer Faser mittlerer Doppelbrechung erlangt werden. In diesem Fall ist sichergestellt, dass ein Polarisationsdrift zwischen zwei Polarisationsmoden des Fasers im Vergleich zu der erzeugten Pulsbreite gering ist.

[0043] Bei Fasern beliebigen Durchmessers ist ein polarisationsstabiler modengekoppelter Betrieb in Faserresonatoren mit Abschnitten einer stark doppelbrechenden Faser möglich. Eine passive Modenkopplung wird durch die Aufnahme eines sättigbaren Absorbers in den Resonator möglich. Eine Modenkopplungsstabilität ist sichergestellt, wenn die Lebensdauer des sättigbaren Absorbers geringer als die Gruppenverzögerung bezüglich eines einzigen Durchlaufs zwischen den Polarisationsmoden in einem jeden der Faserabschnitte ist.

[0044] Bei Vorhandensein von Streuungsreflexionen in einem passiv modengekoppelten Laserresonator kann insbesondere eine Impulsstabilität sichergestellt werden, wenn die Zeitverzögerung zwischen dem Hauptimpuls und dem "Streuungsimpuls", der durch die Streuungsreflexion erzeugt wird, größer als die Lebensdauer des resonatorinternen sättigbaren Absorbers ist. Im Einzelnen ist ein stabiler passiv modengekoppelter Mehrmodenfaserlaser aufgebaut, wenn die Lebensdauer des sättigbaren Absorbers kürzer als die Gruppenverzögerung hinsichtlich eines einzigen Durchlaufs zwischen der ersten und der nächst ordnungshöheren Mode in der Faser ist.

[0045] Alternativ kann ein Hochleistungsfaserlaser unter Verwendung einer Selten-Erd-dotierten Verstärkerfaser mit positiver Streuung und einem schmalen Bandpassfilter sowie stark absorbierenden sättigbaren Absorbers aufgebaut werden. Unter dieser Voraussetzung kann die Bildung von Impulsen in dem Oszillator, die Parabeln sehr nahe kommen (nachstehend als Parabelimpulse bzw. parabelförmige Impulse bezeichnet), stabil werden, was einen großen Anstieg an Eigenphasenmodulation in dem Oszillator ermöglicht, was wiederum einen großen Anstieg hinsichtlich der Leistung im Vergleich zu Oszillatoren auf der Grundlage eines Gaussimpulses oder eines sech<sup>2</sup>-förmigen Impulses ermöglicht. Eine derartige Resonatorausführung ist ebenso mit Ausführungen einer Faser mit einer mittleren Doppelbrechung und einer geringen Polarisationsmodenkopplung und der Verwendung von Mehrmodenfasern zum weiteren Anstieg der Ausgangsleistung verträglich. Die Bildung von hochenergetischen parabelförmigen Impulsen in einem Faserlaseroszillator ist allgemein durch eine optische Impulsbandbreite gekennzeichnet, die größer als die Bandbreite des resonatorinternen Verstärkungsmittels oder der Bandbreite des resonatorinternen Filters ist. Darüber hinaus ist die Stabilität von hochenergetischen parabelförmigen Impulsen in einem Oszillator sichergestellt, wenn die Lebensdauer des sättigbaren Absorbers kürzer als etwa fünfmal der maximalen Impulsbreite des Oszillators ist. Die Stabilität des Oszillators wird ferner verbessert, indem die sättigbaren Absorber in einer starken Sättigung betrieben wird, das heißt durch Bereitstellung einer Impulsenergie, die auf den Absorber auftrifft, die zumindest doppelt so groß wie die Sättigungsenergie ist. Ein optimaler Ort bzw. eine optimale Stelle für den sättigbaren Absorber liegt hinter dem resonatorinternen Filter, wobei diese beiden Elemente am Ausgangsende des Resonators angeordnet sind. Die Hinzufügung einer teilweisen Dispersionskompensation über resonatorinterne Streuungselemente verbessert weiter die Impulsstabilität. Die streuenden Elemente sind idealerweise vor dem sättigbaren Absorber angeordnet. Der lineare Verlust des sättigbaren Absorbers kann durch optische Erwärmung des sättigbaren Absorbers weiter erhöht werden, wobei die optische Absorption des auf den Absorber auftreffenden Lichts verwendet wird.

[0046] Die Erfindung wird nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die angefügte Zeichnung erläutert. Es zeigen:

[0047] Fig. 1 eine Prinzipdarstellung einer polarisationshaltenden Faser mit großem Durchmesser gemäß der Erfindung,

[0048] Fig. 2a ein typisches Brechungsindexprofil einer Faser gemäß der Erfindung,

[0049] Fig. 2b ein Brechungsindexprofil einer Faser, die durch eine alternative Vorformherstellungstechnik ausgebildet ist,

[0050] Fig. 3a einen typischen Aufbau eines Faserlasers gemäß der Erfindung, wobei ein Pumpvorgang bezüglich des Ausgangsendes verwendet wird,

[0051] Fig. 3b das Verstärkungsprofil des Faserlasers gemäß Fig. 3a,

[0052] Fig. 4a eine Darstellung einer Faser mit kreisförmigem Kern gemäß der Erfindung, wobei Beanspruchungsstäbe in der ersten Ummantelung aufgenommen sind,

[0053] Fig. 4b eine Darstellung einer Alternative zur Fig. 4a, wobei Lufthohlräume in der ersten Ummantelung zur Optimierung der Doppelbrechung aufgenommen sind,

[0054] Fig. 5a eine Darstellung eines Ausführungsbeispiels mit einem elliptischen Kern einer Faser, wobei eine weiche innere Ummantelung und eine harte äußere Ummantelung verwendet wird,

[0055] Fig. 5b eine Faser, die gleichartig zu der in Fig. 5a dargestellten Faser ist, jedoch einen kreisförmigen Kern verwendet, der durch eine Ummantelung mit Lufthohlräumen umgeben ist,

[0056] Fig. 6a eine Darstellung einer Faser mit einer inneren Ummantelung, die einen Außenumfang in der Form eines Fünfecks aufweist, das durch eine äußere Ummantelung in der Form eines Polymerüberzugs umgeben ist,

[0057] Fig. 6b eine Darstellung einer Faser mit einer inneren Ummantelung, die einen Außenumfang in der Form eines Siebenecks und eine Außenummantelung in der Form eines Polymerüberzugs aufweist,

[0058] Fig. 6c eine Darstellung einer Faser mit einer inneren Ummantelung, die einen Außenumfang in der Form eines nicht diametral-symmetrischen, nicht gleichseitigen Sechsecks, das heißt eines Sechsecks mit einer verkürzten Seite, und eine Außenummantelung einer Form eines Polymerüberzugs aufweist,

[0059] Fig. 7a eine polarisationshaltende Faser mit einer inneren Ummantelung, die nicht kreisförmige beanspruchungserzeugende Bereiche beinhaltet, und einer äußeren Ummantelung in der Form eines Polymerüberzugs,

[0060] Fig. 7b eine Darstellung einer polarisationshaltenden Faser mit einer inneren Ummantelung, die kreisförmige beanspruchungserzeugende Bereiche beinhaltet, und einer äußeren Ummantelung in der Form eines Polymerüberzugs,

[0061] Fig. 7c eine polarisationshaltende Faser mit einer inneren Ummantelung, die einen Außendurchmesser in der Form eines nicht diametral-symmetrischen, nicht gleichseitigen Sechsecks, d. h. ein Sechseck mit einer verkürzten Seite aufweist, die kreisförmige beanspruchungserzeugende Bereiche beinhaltet, und einer äußeren Ummantelung in der Form eines Polymerüberzugs,

[0062] Fig. 8 eine Darstellung eines seitlich gepumpten, modengekoppelten Faserverstärkers, der einen Mehrmodenkern beinhalten kann,

[0063] Fig. 9 eine Darstellung einer Anwendung der Erfindung auf einen Faserlaser mit stark doppelbrechenden Faserabschnitten in dem Resonator,

[0064] Fig. 10 eine Darstellung einer Anwendung der Erfindung auf einen Faserlaser mit einer unter Spannung gespul- ten, etwa isotropen Faser,

[0065] Fig. 11 einen am Ende gepumpten modengekoppelten Faserlaser mit einer Dispersionskompensation,

[0066] Fig. 12 ein zu Fig. 9 gleichartiges Ausführungsbeispiel, wobei eine Dispersionskompensationseinheit einem faserinternen Gitter entspricht,

[0067] Fig. 13 eine Darstellung eines Ausführungsbeispiels eines Faserlasers, wobei die Bandbreite des Ausgangssignals größer als die Bandbreite eines resonatorinternen Filters ist, um die Bildung eines parabelförmigen Impulses zu ermöglichen,

[0068] Fig. 14 eine Darstellung eines Vergleich des Filterdurchlaßspektrums mit dem Ausgangsimpulsspektrum für den Laser von Fig. 11,

[0069] Fig. 15 eine verallgemeinerte Darstellung eines Hohlleiterverstärkersystems, das in dem Bereich der positiven Streuung arbeitet, und

[0070] Fig. 16 ein allgemeines Beispiel eines polarisationshaltenden Faserlasersystems.

[0071] Eine Prinzipdarstellung einer Polarisationshaltende Faser mit großem Durchmesser ist in Fig. 1 gezeigt. Der Faserkern hat zur Festlegung der Polarisationsachsen der Faser eine elliptische Form. Die Faser beinhaltet eine kreisförmige (oder nicht einheitliche) innere erste Ummantelung und eine nicht einheitliche (oder kreisförmige) äußere zweite Ummantelung. Dabei geben die Klammerausdrücke an, dass die Anordnung der kreisförmigen und der nichteinheitlichen Ummantelung umgekehrt werden kann. Der Brechungsindex der zweiten Ummantelung ist geringer als der Brechungsindex der ersten Ummantelung. Im Prinzip kann jede Ummantelungsform für die nichteinheitliche Ummantelung verwendet werden, sei es dass die nicht einheitliche Ummantelung der ersten oder der zweiten Ummantelung entspricht. Die erste Ummantelung kann aus Germanium dotiertem Silizium bestehen, wohingegen die zweite Ummantelung zur Erlangung einer maximalen Brechungsindexdifferenz aus Fluridglas bestehen kann, obwohl jede Glaskomposition mit geeigneten Brechungsindexunterschieden verwendet werden kann.

[0072] Die Faser kann hergestellt werden, indem mit einer kreisförmigen Vorform begonnen wird, die danach an beiden Seiten zur Erzeugung einer länglichen Struktur bearbeitet wird. Durch Erwärmung und gewissem zusätzlichen Strecken kann die Vorform in eine kreisförmige Struktur zugebracht werden, wobei eine kreisförmige innere Ummantelung erzeugt wird und ein Vorteil aus der Oberflächenspannung gezogen wird. Folglich wird der Faserkern elliptisch und wird die innere Ummantelung kreisförmig. Eine zweite Ummantelung kann dann erzeugt werden, indem die kreisförmige Faservorform mit einem Substratrohr des geeigneten zweiten Ummantelungsmaterial (Fluor oder Borsilikat) überzogen wird und das Rohr nachfolgend an der originalen Faservorform fixiert wird. Die zweite Ummantelung kann zur Erzeugung einer beliebigen Form für das Äußere der zweiten Ummantelung bearbeitet werden. Eine dritte Ummantelung (Überzug) mit einem geringeren Brechungsindex wird dann erzeugt, indem die zweite Ummantelung mit einem geeigneten Polymermaterial überzogen wird. Das Brechungsindexprofil einer derartigen Faser ist in Fig. 2a dargestellt.

[0073] Alternativ kann eine erste Ummantelung direkt während der Vorformherstellung um einen Faserkern mit starker Germanium-, Aluminium- oder Phosphorsilikatdotierung angebracht werden. Die erste Ummantelung wird durch Verringerung der Dotierungsstufe im Vergleich zu dem Kern erzeugt. Der numerische Durchlass der Ummantelung sollte groß sein (größer als 0,15), um eine Kopplung von großen Mengen eines Pumpenlichts zu ermöglichen, und kann einen kreisförmigen oder einen (nicht dargestellten) elliptischen Querschnitt aufweisen. Die äußere Ummantelung kann dann durch eine geeignete Bearbeitung des Vorformsubstratmaterials ausgeführt werden, was durch einen Überzug wie vorstehend beschrieben gefolgt wird. Das Brechungsindexprofil einer derartigen Faser ist in Fig. 2b dargestellt.

[0074] Der zentrale Abschnitt der in Fig. 1 beschriebenen Faser oder der Faserkern kann mit jedem Selten-Erd-Dotierungsmaterial dotiert sein, um die Verwendung der Faser als einen polarisationshaltenden Verstärker zu ermöglichen. In diesem Fall stellt die Faserausführung mit einer kreisförmigen inneren Ummantelung, wie es vorstehend diskutiert ist, einen nicht einheitlichen Absorptionskoeffizienten entlang der Faserlänge sicher, wenn ein Endpumpvorgang von dem Ausgangsende eines Faserverstärkers gemäß der Darstellung von Fig. 3a ausgeführt ist. Dabei wird das Signallicht von der linken Seite aus injiziert bzw. eingeführt und wird das Pumpenlicht von der rechten Seite eingeführt, was den Ausgangsanschluss des Faserverstärkers darstellt. Aufgrund der verringerten Absorption spiralförmiger Strahlen in der inneren Ummantelung wird der effektive Absorptionskoeffizient des Pumpenlichts entlang der Faser abnehmen. Folglich steigt die effektive Signalverstärkung je Längeneinheit stark zu dem Ausgangsanschluss des Verstärkers hin an, was eine Struktur mit einer starken Verstärkung nur in dem Ausgangsanschlussabschnitt des Verstärkers erzeugt, wie es in Fig. 3b dargestellt ist. Da die erzielbare Spitzenleistung in einem Faserverstärker der Länge L im Allgemeinen umgekehrt pro-



portional zu der effektiven Verstärkerlänge ist, was gegeben ist durch die Gleichung  $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-gL)]/g$  (für eine konstante Verstärkung  $g$ ), wobei eine große Verstärkung am Ende eines Verstärkers eine kurze effektive Verstärkerlänge erzeugt und die Erzeugung eines optischen Signals mit einer entsprechend großen Spitzenleistung ermöglicht. Eine nicht einheitliche zweite Ummantelung sowie eine Streuung an der Grenzfläche zwischen der ersten und der zweiten Ummantelung liefert eine effiziente Absorption für in der zweiten Ummantelung fortschreitende Lichtstrahlen.

[0075] Die zweite Faserummantelung von Fig. 1 kann entfallen, die Faser sollte dann jedoch einen Außendurchmesser  $> 150 \mu\text{m}$  aufweisen, um eine Polarisationsmodenkopplung in der Faser zu minimieren. Das Äußere der Faser kann eine beliebige Form aufweisen. Optionale beanspruchungserzeugende Bereiche (Fig. 4a) oder selektive Faserresonatoren (Fig. 4b) können ebenso in der Faserummantelung zur Erlangung eines optimalen Grads an Doppelbrechung gemäß den Darstellungen von Fig. 4a und 4b beinhaltet sein. Die beanspruchungserzeugenden Bereiche in der inneren Ummantelung (oder die Lufthohlräume) können unterschiedliche Formen aufweisen, wie es in Fig. 4b angezeigt ist. Bei einem Fehlen von beanspruchungserzeugenden Bereichen oder Lufthohlräumen sollte das Verhältnis zwischen Hauptachse/Nebenachse des Faserkerns größer als 1,1 sein. Bei Vorhandensein von beanspruchungserzeugenden Bereichen kann ein kreisförmiger Faserkern verwendet werden. Mit oder ohne der Verwendung einer zweiten Ummantelung sollte der gesamte Außendurchmesser der Faser größer als  $150 \mu\text{m}$  sein und sollte die Faserdoppelbrechung größer als  $1 \times 10^{-6}$  sein. Das Äußere der Faser kann durch einen Polymerüberzug zum Schutz der Faser umgeben sein. Zur weiteren Erhöhung der Polarisationshaltefähigkeit der Faser kann ein weicher innerer Überzug und ein harter äußerer Überzug dem Äußeren der Faser zugeführt sein. Eine mögliche Auswahl derartiger Überzugsmaterialien ist die Verwendung eines Silizium-Innenüberzugs und eines Acryl-Außenüberzugs. In diesem Fall kann ein beliebiger Faserdurchmesser verwendet werden und kann eine zweite Ummantelung fehlen. Zwei Beispiele derartiger polarisationshaltender Fasern sind in Fig. 5 gezeigt, wobei Fig. 5a einen elliptischen Kern beinhaltet und Fig. 5b einen durch geringfügig asymmetrische Lufthohlräume umgebenen kreisförmigen Kern beinhaltet. Der zentrale Abschnitt der in Fig. 4 und 5 beschriebenen Fasern oder der Faserkern kann mit jedem Selten-Erd-Dotierungsmaterial dotiert sein, um die Verwendung der Faser als einen polarisationshaltenden Verstärker zu ermöglichen.

[0076] Die typische polarisationshaltende Fähigkeit von Fasern der in Fig. 4a gezeigten Ausführung ist in der nachstehenden Tabelle 1 aufgelistet. Die Fasern hatten nahezu kreisförmige Kerne und alle, bis auf Faser 1, beinhalteten beanspruchungserzeugende Bereiche in der Ummantelung. Die Fasern waren 2 m lang und waren an Spulen mit einem Durchmesser von 10 cm aufgespult. Die Fasern waren "doppeltummantelt" mit einer ersten Ummantelung und einem Niedrig-Index-Polymerüberzug. Eine wirkliche zweite Ummantelung fehlte. Die Fasern waren mit Yb mit Dotierstufen von etwa 2 Mol-% dotiert. Die Polarisationsstilgung entspricht dem relativen Maß von Licht, das in die zweite Polarisationsachse (gemessen an dem Faserausgangsanschluss) der Faser gekoppelt ist, wenn das Licht in den Eingangsanschluss der ersten Polarisationsachse der Faser gekoppelt ist.

[0077] Durch Vergleichen der Fasern 3 und 4 sowie durch Vergleichen der Fasern 5 und 6 ist es klar ersichtlich, dass die Polarisationsstilgung in den Fasern durch eine einfache Erhöhung des Faseraußendurchmessers für die gleiche Polarisationssschwebungslänge stark verbessert ist. Die Änderung hinsichtlich des Kerndurchmessers ist dabei proportional zu dem gesamten Faserdurchmesser und beeinflusst nicht direkt die Polarisationshaltefähigkeit.

[0078] Da die Polarisationsstilgung eine Maßnahme der Polarisationshaltefähigkeit der Faser ist, ist ersichtlich, dass ein geringer Anstieg des Faserdurchmessers die Polarisationshaltefähigkeit um eine Größenordnung erhöhen kann. Dieser Nutzen gilt für jedes Maß der Faserdoppelbrechung, bringt aber deutlich den größten Nutzen in einem mittleren Bereich, wobei konventionelle Fasern mit einem Außendurchmesser von  $125 \mu\text{m}$  den Polarisationshaltebetrieb für eine bestimmte Größe der Doppelbrechung nicht ermöglichen. Dieser mittlere Bereich umfasst Doppelbrechungswerte von  $1 \times 10^{-6}$  bis  $1 \times 10^{-4}$ . Fasern in diesem Bereich der Doppelbrechung werden hier als Fasern mittlerer Doppelbrechung bezeichnet. Bei einer Wellenlänge von  $1 \mu\text{m}$  sind die entsprechenden Polarisationssschwebungslängen für den Bereich einer mittleren Doppelbrechung jeweils zwischen 100 cm und 1,0 cm.

Tabelle

Polarisationstilgung in Fasern verschiedener Ausführung

#	Faser- bean- spruch- ung	Faser- durch- messer ( $\mu\text{m}$ )	Faser- kern- durch- messer ( $\mu\text{m}$ )	Dop- pel- brech- ung	Polarisa- sations- schwe- bungs- länge bei 1,05 $\mu\text{m}$ (cm)	Polari- sations- tilgung nach 2 m der Faser	Moden- kopp- lungs- stabi- lität
1	Keine Bean- spruch- ung	135	8	$<1 \times 10^{-6}$	nicht anwendbar		stabil
2	Sehr geringe Bean- spruch- ung	135	7	$8 \times 10^{-6}$	13	20/1	stabil
3	Geringe Bean- spruch- ung	125	7	$1,6 \times 10^{-5}$	6,5	100/1	sta- bil
4	Geringe Bean- spruch- ung	200	11	$1,6 \times 10^{-5}$	6,5	1000/1	sta- bil
5	Hohe Bean- spruch- ung	100	6	$4,2 \times 10^{-5}$	2,5	100/1	nicht sta- bil
6	Hohe Bean- spruch- ung	125	7,5	$4,2 \times 10^{-5}$	2,5	1000/1	nicht sta- bil

[0079] Effiziente Doppelmantelfasern können ebenso durch Anwendung von Fasern mit nur einer Innenummantelung und einer Außenummantelung in der Form eines Polymerüberzugs aufgebaut sein. In diesem Fall kann eine innere Ummantelungsform in der Form eines Fünfecks gemäß der Darstellung von Fig. 6a angewendet werden. Dabei kann der Kern einer Mehrmodeneinheit oder einer Einmodeneinheit entsprechen. Eine derartige Ummantelungsform weist ge-

ringe innere Winkel auf, die die Pumpmodenkopplung und die Pumpabsorption in der Faser optimieren. Eine große Pumpabsorption ist sicher für eine Anwendung derartiger Fasern als Hochleistungsimpulsverstärker nützlich.

[0080] Eine Ummantelungsform in der Form eines Siebenecks ist gleichfalls gemäß der Darstellung von Fig. 6b möglich. Ein Siebeneck erzeugt eine geringere Pumpmodenkopplung, da der innere Winkel zwischen den Ummantelungsflächen kleiner ist. Jedoch ist eine derartige Faser leichter zu spleißen beziehungsweise verbinden, was in vielen Anwendungen bevorzugt wird, da eine derartige Struktur sehr nahe einer Struktur eines perfekten Kreises kommt.

[0081] Dabei ist anzumerken, dass die zwei Ummantelungsformen symmetrisch sind, jedoch decken sie eine Fläche nicht ab. Derartige Ummantelungen ermöglichen jedoch eine Modenkopplung der Pumpmoden in der Faserleitung für eine effiziente Absorption von spiralförmigen Strahlen. Infolge der sich ergebenden einheitlichen Pumpabsorption müssen derartige Fasern nicht notwendigerweise zur Erlangung der höchstmöglichen Leistungen verwendet werden, wenn sie als Verstärker für hohe Spitzenleistungsimpulse verwendet werden. Alternativ können ebenso ein Polygon mit neun Seiten oder elf Seiten oder allgemein  $(2n-1)$  Seiten, wobei  $n > 4$  Seiten ist, verwendet werden (nicht dargestellt).

[0082] Eine verbesserte Absorption von spiralförmigen Strahlen kann ebenso durch Verwendung eines nicht-diametral symmetrischen, nicht-gleichseitigen sechseckigen Ummantelungsverlaufs gemäß der Darstellung von Fig. 6c erlangt werden. Aufgrund der verringerten Stufe der Symmetrie einer derartigen Ummantelungsform wird eine nochmals bessere Pumpmodenkopplung erlangt, was zu einer Maximierung der Pumpmodenabsorption führt. Dabei ist anzumerken, dass Modifikationen dieser Ummantelungsausführungen, die mehrere Überzüge und eine zweite nicht-kreisförmige innere Ummantelung beinhalten, ebenso möglich sind (nicht dargestellt).

[0083] Zur Ermöglichung eines Polarisationshaltebetriebs der Faserausführungen gemäß der Darstellung von Fig. 7 können nicht-kreisförmige beanspruchungserzeugende Bereiche hinzugefügt sein. Beispielsweise können nicht-kreisförmige (oder kreisförmige beanspruchungserzeugende Bereiche dem Faserquerschnitt gemäß der Darstellung von Fig. 6a, wie es in Fig. 7a dargestellt ist, hinzugefügt sein. Kreisförmige beanspruchungserzeugende Bereiche in Verbindung mit einer fünfeckigen Faser sind nicht separat dargestellt. Derartige Fasern können einen Einmoden- oder einen Mehrmodenkern aufweisen. Kreisförmige beanspruchungserzeugende Bereiche sind in Verbindung mit einer Siebeneckfaser gemäß der Darstellung von Fig. 7b dargestellt. Allgemein können kreisförmige beanspruchungserzeugende Bereiche in jeder Doppelmantel- oder Dreifachmantelfaser beinhalten sein, wobei sowohl die erste innere und/oder die zweite innere Ummantelung nicht einheitlich sein können. Fig. 7c entspricht einer zusätzlichen Anwendung einer polarisationshaltenden Faser, die eine nicht-diametral symmetrische, nicht-gleichseitig sechseckige Ummantelungsform beinhalten.

[0084] In einer jeden Form der Erfindung gemäß der Fig. 6 und 7 kann der Faserkern einer Mehrmodeneinheit oder einer Einmodeneinheit entsprechen.

[0085] Die in Tabelle 1 angeführten Fasern wurden ebenso als Teil eines Resonators eines passiv modengekoppelten Yb-Faserlasers geprüft. Eine verallgemeinerte Darstellung des modengekoppelten Systems der Erfindung ist in Fig. 8 gezeigt. Die Fasern wurden von der Seite mit räumlich inkohärentem Licht von einem Hochleistungspumpenlaser gepumpt, der in die Ummantelung gekoppelt ist. Das Bandpassfilter (F) weist eine spektrale Bandbreite von 3 nm auf, die um 1040 nm zentriert ist. Ein Polarisator (p) war mit einer der Polarisationsachsen der Faser ausgerichtet. Der sättigbare Absorber war eine Schicht aus AlInGaAs mit einer Dicke von 0,64  $\mu\text{m}$  und einer Bandkante bzw. Bandgrenze von 1040 nm, die an einer Goldschicht angebracht war, die an einer Wärmesenke angebracht war. Die Trägerlebensdauer des Absorbers war in der Größenordnung von 1 ps. Die 4%-Reflexion von dem gerade getrennten resonatorinternen Faserende bzw. Faseranschluß diente als der Ausgangskopplelspiegel. Für eine Faserlänge von 2 m erzeugte der Laser Impulse mit einer Wiederholungsrate von ungefähr 50 MHz mit einer mittleren Leistung von 10 bis 40 mW in Abhängigkeit der Kerngröße der Faser. Die erzeugte Impulsbreite entsprach typischerweise 2 ps.

[0086] Jedoch erzeugten nur die Fasern mit geringen Doppelbrechungswerten und entsprechend langen Schwebungslängen eine stabile Modenkopplung. Der Grund liegt darin, dass für geringe Doppelbrechungswerte das in der ersten Polarisationsachse fortschreitende Hauptsignal und jedes in der zweiten Polarisationsachse fortschreitende sekundäre Signal zur Erzeugung eines einzigen gekoppelten Polarisationszustands miteinander koppeln, welcher in dem Resonator schwingen kann. Ist die Doppelbrechung der Faser zu hoch, neigen das Hauptsignal und das sekundäre Signal dazu, nicht miteinander zu koppeln, was zu einem instabilen und zeitabhängigen Betrieb des Modenkopplungsvorgangs führt. Um stabil modengekoppelte Impulse in einem einzigen Polarisationszustand bzw. einem Einfachpolarisationszustand zu erlangen, ist eine große Polarisationsstörung für kleine Doppelbrechungswerte erforderlich, wie es durch die Verwendung von Fasern mit mittlerer Doppelbrechung mit einem Außendurchmesser  $> 125 \mu\text{m}$  ermöglicht ist. Darüber hinaus ermöglicht die Verwendung von Fasern mit Durchmessern  $> 125 \mu\text{m}$ , dass sie starrer sind, was ebenso die Polarisationsmodenkopplung bei Vorhandensein von Faserbiegungen minimiert, das heißt Fasern mit großem Durchmesser ermöglichen eine Spulung mit geringerem Verlust an Polarisationsstörung im Vergleich zu Fasern mit geringerem Durchmesser. Um eine Polarisationsmodenkopplung zu minimieren können ebenso zwei Faserummantelungen und/oder zwei (oder mehr) geeignet ausgewählte Schichten von Überzugsmaterial ebenso angewendet sein.

[0087] Der Resonator gemäß der Darstellung von Fig. 8 erzeugte ebenso stabile Impulse in einer Mehrmodenfaser mit einem Kerndurchmesser von 11  $\mu\text{m}$  (Faser #4), welche mehr als eine Quermode trug. Zur Ermöglichung eines stabilen Impulsbetriebs wurde ein Faserkegel in die Faser nahe einem Faseranschluss als einem Modenfilter eingebracht. Der Kegel ist nicht separat dargestellt. Durch eine Kegelform des Außendurchmessers von 200–100  $\mu\text{m}$ , verjüngte sich der Kerndurchmesser entsprechend von 11  $\mu\text{m}$  auf 5,5  $\mu\text{m}$ , was einen Einmodenbetrieb ermöglicht. Folglich konnte typischerweise die Grundmode der Faser mit einer Effizienz von 99% erregt werden. Zur Sicherstellung einer stabilen Modenkopplung in diesem Fall musste die Lebensdauer des sättigbaren Absorbers kürzer als die Gruppenverzögerung eines Durchlaufs zwischen der Grundmode und der Mode mit der nächsthöheren Ordnung in der Faser sein. Der Grund liegt darin, dass die Mode mit der nächsthöheren Ordnung einen kleinen Impuls in die Grundmode der Faser an einem jeden Ende beziehungsweise Anschluss des Resonators koppelt. Der geringe Impuls wird mit Bezug auf den Hauptimpuls zeitverzögert. Der geringe Impuls erzeugt jedoch ein Injektionssignal für das Anwachsen eines zweiten zeitverzögerten Impulses. Nach einem weiteren Durchlauf wird nochmals ein weiterer zeitverzögerter Impuls erzeugt und so weiter. Das Anwachsen jedes sekundären Impulses wird jedoch verhindert, falls der zweite Impuls durch den sättigbaren Absorber

stark absorbiert wird, was erfordert, dass die Lebensdauer des sättigbaren Absorbers kürzer als die Gruppenverzögerung für einen Durchlauf zwischen der Grundmode und der Mode mit der nächsthöheren Ordnung ist.

[0088] Bei Vorhandensein von störenden Reflexionen in dem Resonator sollte allgemein die Lebensdauer des sättigbaren Absorbers geringer als die Zeitverzögerung zwischen dem störenden Impuls (erzeugt durch die störende Reflexion) und dem Hauptimpuls in dem Resonator sein.

[0089] In Fig. 9 ist beispielsweise ein modengekoppelter Faserlaser gezeigt, der zwei Abschnitte einer stark doppelbrechenden Faser in einem Resonator beinhaltet. Die Polarisationsachsen der Faserabschnitte sind als parallel zueinander oder antiparallel zueinander ausgerichtet angenommen. Infolge von kleinen unvermeidbaren Fehlausrichtungen der Polarisationsachsen werden kleine in der "falschen" Polarisationsachse fortschreitende Impulse somit an jeder Verbindung zwischen den Faserabschnitten erzeugt. Eine Impulsstabilität erfordert folglich, dass die Gruppenverzögerung für einen Durchlauf zwischen den Polarisationsmoden in einem jeden Faserabschnitt größer als die erzeugte Impulsbreite ist. Unter der Annahme, dass beispielsweise die Faserabschnitte Polarisationschwebungslängen von 3 mm bei einer Wellenlänge von  $1,55 \mu\text{m}$  und eine entsprechende Doppelbrechung von  $5 \times 10^{-4}$  aufweisen, ist die Polarisationsgruppenverzögerung ungefähr 3,5 ps in einem 2 m-Faserabschnitt. Für Faserabschnitte mit 2 m Länge sollte der sättigbare Absorber somit eine Lebensdauer von weniger als 3,5 ps zur Sicherstellung einer optimalen Stabilität des modengekoppelten Lasers haben.

[0090] Der verringerte Grad an Modenkopplung in mehrschichtig ummantelten Fasern oder Fasern mit Außendurchmessern  $> 125 \mu\text{m}$  ermöglicht ebenso eine Verbesserung der Polarisationshaltefähigkeit isotroper, mit fest gespannt gespulten Fasern, wie es von Fermann et al. in der US Patent Nr. 6,072,811 vorgeschlagen ist. Da derartige Fasern geringer empfindlich hinsichtlich einer durch eine Mikrobiegung induzierte Modenkopplung sind, kann eine verbesserte Polarisationsstiltung erlangt werden. Derartige Fasern können als direkter Ersatz der Fasern mit mittlerer oder hoher Doppelbrechung gemäß Fig. 8 verwendet werden. In Fig. 10 ist ein Resonator mit einem modengekoppelten Faserlaser dargestellt, der eine unter Spannung gespulte etwa isotrope Faser beinhaltet. Dabei sind an einem jeden Ende des Resonators zusätzliche Wellenplatten ( $w_1$ ,  $w_2$ ) beinhaltet, um sicherzustellen, dass der Polarisationszustand in der Faserspule für eine optimale Laserstabilität etwa linear ist.

[0091] Ein Pumpen an einem Ende von einem modengekoppelten Oszillator über eine dichroitische Strahlungsteilungseinheit kann eher als ein Pumpen von der Seite aus verwendet werden, wie es in Fig. 11 gezeigt ist. Die Verstärkungsfaser kann eine Faser mit einer mittleren Doppelbrechung, einer hohen Doppelbrechung oder eine Mehrmodenfaser beinhalten. Das gerade getrennte Faserende kann mit einem dielektrischen Spiegel beschichtet bzw. überzogen sein, um das Maß an Ausgangskopplung zu verringern. Alternativ könnte ein externer Spiegel ebenso als ein Ausgangskoppler verwendet werden.

[0092] Dispersionskompensationselemente (DC) wie etwa ein oder zwei große Gitterpaare, Prismenpaare oder Grismenpaare können ebenso in dem Resonator zur Erzeugung kürzerer Impulse und zur Vereinfachung des modengekoppelten Betriebs beinhaltet sein. Darüber hinaus könnte der Sättigbare-Absorber-Spiegel (SA) durch einen Standardspiegel ersetzt sein und könnte ein zusätzlicher optischer Modulator in dem Resonator (nicht separat dargestellt) zur Ermöglichung einer Erzeugung kurzer Impulse über eine aktive Modenkopplung beinhaltet sein. Ein optisches Filter (F) kann ebenso Teil eines derartigen Resonators sein.

[0093] Ein modengekoppelter Oszillator kann ebenso unter Verwendung eines Fasergitters aufgebaut sein, das direkt in der Verstärkungsfaser zur weiteren Integration der Resonatorkomponenten gemäß der Darstellung von Fig. 12 eingefügt ist. Die Verstärkungsfaser kann wiederum eine Faser mittlerer Doppelbrechung, hoher Doppelbrechung oder eine Mehrmodenfaser beziehungsweise MM-Faser beinhalten. Das Gitter kann in Abhängigkeit der gewünschten Ausgangscharakteristik des Lasers eine Chirp-Charakteristik oder Nicht-Chirp-Charakteristik aufweisen. Wird das Pumpenlicht von dem Ende einer Faser mit einem sättigbaren Absorber injiziert oder falls eine Form eines Pumpen von der Seite verwendet wird, könnte eine zusätzliche Verstärkerfaser an den Fasergitteranschluss des Resonators für eine zusätzliche Signalverstärkung gespleißt beziehungsweise angebunden werden, woraus ein sehr kompakter Hochleistungsfaserlaser resultiert. Eine derartige Systemkonfiguration ist nicht separat dargestellt.

[0094] Ein Ausführungsbeispiel eines modengekoppelten Hochleistungsfaserlasers ist unter Bezugnahme auf Fig. 13 erläutert. Die Aufnahme des Streuungskompensationselements (DC) ist optional, jedoch wird die beste Systemleistung erlangt, falls das Streuungskompensationselement eine negative Streuung bzw. Dispersion bereitstellt und etwa 50% der gesamten (positiven) Faserstreuung kompensiert. Das Filter (F) weist eine Bandbreite (FWHM) auf, die geringer als die Verstärkungsbandbreite (FWHM) der Faser ist. Für Nd- oder Yb-Faserlaser liegt eine optimale Filterbandbreite in dem Bereich von 1 bis 30 nm. Die Verstärkungsfaser hat eine positive Streuung. Die Faser ist polarisationshaltend und eine Faser mittlerer Doppelbrechung und hoher Doppelbrechung oder eine MM-Faser kann verwendet werden. Die Polarisationsseinheit ist mit einer der Polarisationsachsen der Faser ausgerichtet. Die Bildung von parabelförmigen Impulsen wird dann ermöglicht, wenn ein stark absorbierender sättigbarer Absorber verwendet wird. Die lineare Absorption des sättigbaren Absorbers beträgt 90%. Wird der sättigbare Absorber ebenso in starker Sättigung betrieben, wird die Neigung von Hochleistungsimpulsen zum Unterbrechen in dem Resonator unterdrückt. Folglich können parabelförmige Hochleistungsimpulse mit linearer Chirp-Charakteristik erzeugt werden. Da parabelförmige Impulse relativ unempfindlich hinsichtlich einer Eigenphasenmodulation sind, kann die Energie der parabelförmigen Impulse im Vergleich zu Soliton-förmigen und Gauss-förmigen Impulsen viel höher sein. Ein Schlüsselparameter zur Erlangung von parabelförmigen Impulsen ist eine erzeugte spektrale Bandbreite der Ausgangsimpulse, die größer als die Innenresonatorfilterbandbreite ist, ein Merkmal, das mit weiteren Modenkopplungstechniken nicht erzielbar ist. Ein typisches Beispiel des erzielbaren Impulsspektrums im Vergleich zu der Innenresonatorfilterbandbreite für einen modengekoppelten Yb-Oszillator ist in Fig. 14 gezeigt. Die erhöhte spektrale Bandbreite im Vergleich zu der Innenresonatorfilterbandbreite ist eine ideale Maßnahme in dem Ausmaß, in dem die Innenresonatorimpulse eine parabelförmige Impulsform erlangt haben. Die Erzeugung von parabelförmigen Hochleistungsimpulsen ist nicht auf Fabry-Perot-Resonatoren beschränkt, wie sie dargestellt sind, sondern es kann jede Ausführung eines Wellenleitungslaserresonators mit einem Verstärkungswellenleiter einer positiven Innenresonatorstreuung und einem schmalen Bandpassfilter angewendet sein. Immer wenn die Impulsbandbreite

die Innenresonatorfilterbandbreite übersteigt, ergibt sich die Bildung von nahezu parabelförmig ausgebildeten Impulsen. Eine optimale Stabilität für eine parabelförmige Impulserzeugung ist sichergestellt, wenn die Lebensdauer des Absorbers geringer als das Fünffache der maximalen Breite der erzeugten Impulse ist, wobei bevorzugt wird, dass die Lebensdauer eines sättigbaren Absorbers geringer als der einfachen Breite der erzeugten Impulse ist.

- 5 [0095] In einem Beispiel einer bestimmten Ausführung eines Oszillators für parabelförmige Impulse gemäß der Darstellung von Fig. 13 weist die Innenresonator-Yb-Faserlänge eine Länge von 4 m auf, hat das optische Filter eine Bandbreite von 10 nm, war der nicht-gesättigte Verlust des Absorbers 90% und war der sättigbare Absorber an dem Innenresonatoranschluss angeordnet, der die streuungs- bzw. dispersionskompensierenden Elemente beinhaltet. Der sättigbare Absorber hatte eine Lebensdauer von 4 ps. Das streuungskompensierende Element war zur Kompensation von 50% der positiven Faserstreuung eingestellt. Der Ausgangskopplungsspiegel hatte eine Reflexionseigenschaft von 80% bei der Signalwellenlänge von 1,05  $\mu\text{m}$ . Der Laser erzeugte die Impulse mit einer mittleren Leistung bis zu 500 mW, entsprechend einer Impulsenergie von 20 nJ. Die Impulse hatten etwa eine lineare Chirp-Eigenschaft und waren etwa auf die Bandbegrenzung mit einem weiteren Satz von Streuungskompensationselementen (nicht dargestellt) zurückkomprimierbar.
- 10 [0096] Das vorstehend erläuterte System ist eine Darstellung eines allgemeinen optischen Systems, das in einem positiven Streuungsbereich arbeitet, mit einer Einheit mit einem Wellenleiter, der eine positive Streuung verstärkt, einer teilweisen Streuungskompensation, einem optischen Bandpassfilter und einem Amplitudenmodulationsmechanismus gemäß der Fig. 15. Allgemein können eine teilweise Streuungskompensation, die Filterfunktion sowie die Amplitudenmodulationsfunktionen ebenso durch Wellenleiterelemente bereitgestellt werden. Ein derartiges optisches System kann Teil eines Fabry-Perot-Laserresonators, eines Ringlaserresonators sein oder kann ebenso Teil eines optischen Übertragungssystems mit einer langen Distanz, wie es in der Telekommunikation verwendet wird, sein.
- 15 [0097] Es können ebenso polarisationshaltende, mitteldoppelbrechende Fasern in weiteren Faserlaser- oder Verstärkeranwendungen verwendet werden. Ein allgemeines Beispiel einer derartigen Faser als einem polarisationshaltenden Verstärker ist in Fig. 16 gezeigt. In diesem Beispiel ist das Signallicht in den PM-Verstärker über eine polarisationshaltende Faser und eine polarisationshaltende Faserverbindung beziehungsweise Faserspleißung gekoppelt. Eine derartige Verbindung beziehungsweise Spleißung kann durch Drehen der zwei Fasern in geeigneter Weise vor dem Spleißvorgang beziehungsweise Verbindungsvorgang erzielt werden. Der Verstärker kann vom Ende her gepumpt oder von der Seite her gepumpt sein. Das Pumpenlicht kann ebenso über optische Koppler injiziert sein, die an einem Ende der Verstärkerfaser oder an einer Stelle in der Verstärkerfaser angeordnet ist.
- 20 [0098] Weitere Modifikationen und Änderungen der Erfindung sind für den Fachmann aus der vorstehenden Offenbarung und Lehre ersichtlich und es ist beabsichtigt, dass die Erfindung lediglich durch die angefügten Ansprüche bemessen ist.
- 25 [0099] Wie vorstehend beschrieben wird eine neue optische Polarisationshaltefaser bereitgestellt, die als ein Hochleistungs-Polarisationshaltefaserlaser oder -verstärker verwendet werden kann. Eine Unempfindlichkeit des Polarisationszustands hinsichtlich einer externen Faserbiegung und Temperaturänderungen wird erzielt, indem eine Polarisationsmodenkopplung über eine Reduzierung von Beanspruchungen in dem Faserkern durch eine Erhöhung des Faserdurchmessers minimiert wird. Alternativ kann die Polarisationsmodenkopplung durch eine Optimierung des Faserüberzugs zur Minimierung von Beanspruchungen an der Grenzfläche zwischen der Faser und der Ummantelung minimiert sein. Folglich wird eine Unempfindlichkeit hinsichtlich einer Polarisationsmodenkopplung bei stark verringerten Werten einer Doppelbrechung im Vergleich zu Fasern mit einem kleinen Durchmesser erlangt. Die Faser ist von bedeutendem Nutzen in jeder Anwendung, in der die Polarisationsstabilität bedeutend ist, und wird in Telekommunikationsanwendungen insbesondere zur Verringerung der Polarisationsmodendispersion nützlich sein. Eine Ausführung eines einen parabelförmigen Impuls erzeugenden Faserlasers ist ebenso als ein bestimmtes Hochleistungsbeispiel beschrieben.

#### Patentsprüche

- 45 1. Polarisationshaltefaser mit einem Faserkern, einer ersten den Kern umgebenden Ummantelung, einer ersten die erste Ummantelung umgebenden Überzug, wobei die erste Ummantelung eine Querschnittsform in der Form eines verformten Sechsecks oder eines Polygons mit  $(2n-1)$  Seiten hat, wobei  $n > 2$  ist.
- 50 2. Faser nach Anspruch 1, wobei der Kern elliptisch ist.
3. Faser nach Anspruch 1, wobei der Kern eine Doppelbrechung zwischen  $1 \times 10^{-6}$  und  $1 \times 10^{-4}$  für die Grundmode hat.
- 55 4. Faser nach Anspruch 1, wobei der Außendurchmesser der Faser zumindest 125  $\mu\text{m}$  beträgt.
5. Faser nach Anspruch 1, wobei der Überzug aus einem Polymer ausgebildet ist.
6. Faser nach Anspruch 1, 2, 3, 4 oder 5, wobei zumindest der Faserkern mit einem Selten-Erd-Dotierungsmaterial dotiert ist.
- 60 7. Polarisationshaltefaser mit einem Faserkern, einer ersten den Kern umgebenden Ummantelung, einer ersten die erste Ummantelung umgebenden Überzug und einer Einrichtung zur Minimierung einer Polarisationsmodenkopplung in der Faser, wobei die Faser einen minimalen Faseraußendurchmesser größer als 125  $\mu\text{m}$  hat.
- 65 8. Faser nach Anspruch 7, ferner mit zumindest einem in der ersten Ummantelung angeordneten Beanspruchungserzeugungsbereich.
9. Faser nach Anspruch 8, wobei der zumindest eine Beanspruchungserzeugungsbereich zumindest einen Bean-

spruchsstab beinhaltet.

10. Faser nach Anspruch 7, ferner mit einer zweiten die erste Ummantelung umgebenden Ummantelung.
11. Faser nach Anspruch 7, ferner mit zumindest einem in der ersten Ummantelung angeordneten Lufthohlraum.
12. Faser nach Anspruch 11, mit einer Vielzahl der Lufthohlräume, die in einem symmetrischen oder asymmetrischen Muster in der ersten Ummantelung angeordnet sind. 5
13. Faser nach Anspruch 8, wobei die erste Ummantelung einen kreisförmigen Querschnitt aufweist.
14. Faser nach Anspruch 7, ferner mit einer Einrichtung zur Optimierung eines Doppelbrechungsgrades der Faser.
15. Faser nach Anspruch 14, wobei der Doppelbrechungsgrad zwischen  $1 \times 10^{-6}$  und  $1 \times 10^{-4}$  liegt.
16. Faser nach Anspruch 7, wobei der Kern nicht kreisförmig ist und ein Verhältnis zwischen einer Hauptachse und einer Nebenachse von zumindest 1,1 aufweist. 10
17. Faser nach einem der Ansprüche 7 bis 16, wobei zumindest der Faserkern mit einem Selten-Erd-Element-Dotierungsmaterial dotiert ist.
18. Faser nach Anspruch 7, wobei der Außendurchmesser zumindest etwa  $150 \mu\text{m}$  beträgt.
19. Faser nach einem der Ansprüche 7 oder 18, wobei die Faser ein Polarisationsstilungsverhältnis von zumindest etwa 100 : 1 nach 2 Metern der Faser aufweist. 15
20. Polarisationshaltefaserlaser mit einem Selten-Erd-Material-dotierten Faserkern, einer ersten den Kern umgebenden Ummantelung, einer zweiten die erste Ummantelung umgebenden Ummantelung, einem die zweite Ummantelung umgebenden Überzug, wobei die erste Ummantelung oder die zweite Ummantelung einen nicht-kreisförmigen Querschnitt aufweist. 20
21. Faserlaser nach Anspruch 20, wobei der Kern elliptisch ist.
22. Faserlaser nach Anspruch 20, wobei der Kern eine Doppelbrechung zwischen  $1 \times 10^{-6}$  und  $1 \times 10^{-4}$  für die Grundmode aufweist.
23. Faserlaser nach Anspruch 20, wobei der Außendurchmesser der Faser zumindest  $125 \mu\text{m}$  beträgt. 25
24. Faserlaser nach Anspruch 20, wobei der Überzug aus einem Polymer ausgebildet ist.
25. Faserlaser nach Anspruch 1 oder 20, wobei zumindest der Faserkern mit Yb, Nd, Er, Er/Yb oder Tm dotiert ist.
26. Polarisationshaltefaserlaser mit einem Faserkern, einer ersten den Kern umgebenden Ummantelung, einem die erste Ummantelung umgebenden Überzug und einer Einrichtung zur Minimierung einer Polarisationsmodenkopplung in dem Faserlaser mit einem minimalen Faser-  
außendurchmesser größer als  $125 \mu\text{m}$ . 30
27. Faserlaser nach Anspruch 26, ferner mit zumindest einem in der ersten Ummantelung angeordneten Beanspruchungserzeugungsbereich. 35
28. Faserlaser nach Anspruch 27, wobei der zumindest eine Beanspruchungserzeugungsbereich zumindest einen Beanspruchungsstab beinhaltet.
29. Faserlaser nach Anspruch 26, ferner mit einer zweiten die erste Ummantelung umgebenden Ummantelung.
30. Faserlaser nach Anspruch 26, ferner mit zumindest einem in der ersten Ummantelung angeordneten Lufthohlraum. 40
31. Faserlaser nach Anspruch 30, mit einer Vielzahl der Lufthohlräume, die in einem symmetrischen oder asymmetrischen Muster in der ersten Ummantelung angeordnet sind.
32. Faserlaser nach Anspruch 27, wobei die erste Ummantelung einen kreisförmigen Querschnitt hat.
33. Faserlaser nach Anspruch 26, ferner mit einer Einrichtung zur Optimierung eines Doppelbrechungsgrades des Faserlasers. 45
34. Faserlaser nach Anspruch 33, wobei der Doppelbrechungsgrad zwischen  $1 \times 10^{-6}$  und  $1 \times 10^{-4}$  liegt.
35. Faserlaser nach Anspruch 26, wobei der Kern nicht kreisförmig ist und ein Verhältnis zwischen einer Hauptachse und einer Nebenachse von zumindest 1,1 aufweist.
36. Faserlaser nach Anspruch 26, wobei zumindest der Faserlaserkern mit Yb dotiert ist.
37. Faserlaser nach Anspruch 26, wobei der Außendurchmesser zumindest etwa  $150 \mu\text{m}$  beträgt. 50
38. Faserlaser nach Anspruch 26 oder 37, wobei der Faserlaser ein Polarisationsstilungsverhältnis von zumindest etwa 100 : 1 nach 2 Metern des Faserlasers zeigt.
39. Faserlaser nach Anspruch 20 oder 26, ferner mit einer Einrichtung zur Modenkopplung des Faserlasers.
40. Faserlaser nach Anspruch 39, wobei die Modenkopplungseinrichtung einen sättigbaren Absorber beinhaltet.
41. Faserlaser nach Anspruch 40, wobei der Faserkern Mehrmoden trägt. 55
42. Faserlaser nach Anspruch 41, wobei der sättigbare Absorber eine Lebensdauer aufweist, die kürzer als eine Gruppenverzögerung für einen Durchlauf zwischen der Grundmode und der Mode der nächsthöheren Ordnung in der Faser ist.
43. Faserlaser nach Anspruch 26, wobei der Faserlaser zumindest zwei Abschnitte einer Hochdoppelbrechungs-faser aufweist und eine Gruppenverzögerung für einen Durchlauf zwischen Polarisations-eigenmoden in einem jeden Abschnitt größer als eine erzeugte Laserimpulsbreite ist. 60
44. Faserlaser nach Anspruch 20 oder 26, wobei der Laser am Ende gepumpt wird.
45. Faserlaser nach Anspruch 20 oder 26, wobei der Faserlaser seitlich gepumpt wird.
46. Faserlaser nach Anspruch 20 oder 26, wobei der Faserlaser eine Dispersionskompensationseinheit mit einem Gitter, einem Prisma, einem Gristm und/oder einem faserinternen Gitter in einem Laserresonator beinhaltet. 65
47. Faserlaser nach Anspruch 20 oder 26, wobei der Faserlaser eine Faser mit einer positiven Streuung und ein Filter mit einer Bandbreite aufweist, die geringer als eine Verstärkungsbandbreite des Faserlasers ist, wodurch ermöglicht wird, dass der Faserlaser parabelförmige Impulse ausgibt.



48. Faserlaser nach Anspruch 47, ferner mit einem sättigbaren Absorber mit einer Lebensdauer, die geringer als fünfmal die maximale Breite der Ausgangsimpulse ist.
49. Faserlaser nach Anspruch 47, ferner mit einem sättigbaren Absorber mit einer Lebensdauer, die geringer als eine maximale Breite der Ausgangsimpulse ist.
50. Faser nach Anspruch 1 oder 7, wobei der Faserdurchmesser größer als  $150\text{ }\mu\text{m}$  ist.
51. Faser nach Anspruch 1 oder 7, wobei der Überzug ein Mehrschichtüberzug ist, der eine innere Schicht mit einem geringeren Elastizitätsmodus und eine äußere Schicht mit einem höheren Elastizitätsmodus beinhaltet.
52. Faserlaser nach Anspruch 20 oder 26, ferner mit einem sättigbaren Absorber mit einer Lebensdauer, die geringer als fünfmal die maximale Breite der Laserausgangsimpulse ist.
53. Faserlaser nach Anspruch 20 oder 26, wobei der Faserdurchmesser größer als  $125\text{ }\mu\text{m}$  ist.
54. Faserlaser nach Anspruch 20 oder 26, wobei der Überzug einem Mehrschichtüberzug entspricht, der eine innere Schicht mit einem geringeren Elastizitätsmodus und eine äußere Schicht mit einem höheren Elastizitätsmodus beinhaltet.
55. Faserlaser nach Anspruch 20 oder 26, ferner mit zumindest einem resonatorinternen Polarisationsauswahlelement.
56. Passiv modengekoppelter Faserlaser mit einer Faser mit einer hohen Doppelbrechung, einem resonatorinternen Polarisationsauswahlelement, einem sättigbaren Absorber mit einer Trägerlebensdauer, die kürzer als eine Gruppenverzögerung für einen einmaligen Durchlauf zwischen den zwei Polarisationsachsen der Faser ist, und einer optischen Pumpenquelle.
57. Passiv modengekoppelter Faserlaser mit einer Selten-Erd-Material-dotierten Faser, die mehr als eine Quermode bei der Betriebswellenlänge trägt, einem resonatorinternen Polarisationsauswahlelement und einem sättigbaren Absorber mit einer Trägerlebensdauer, die kürzer als eine Gruppenverzögerung für einen einmaligen Durchlauf zwischen einer Grundmode und einer Mode der nächsthöheren Ordnung der Faser ist.
58. Passiv modengekoppelter Faserlaser mit einer Selten-Erd-Material-dotierten Verstärkungsfasern, einem resonatorinternen optischen Bandpassfilter mit einer Bandbreite, die geringer als die Bandbreite der Verstärkungsfasern ist, wobei der Laser dadurch eine optische Ausgabe in der Form kurzer optischer Impulse mit einer optischen Bandbreite erzeugt, die die Bandbreite des Bandpassfilters übersteigt.
59. Polarisationshaltefasern mit einem Faserkern, einer ersten den Kern umgebenden Ummantelung, einer zweiten die erste Ummantelung umgebenden Ummantelung, einer dritten die zweite Ummantelung umgebenden Überzug, wobei die erste Ummantelung einen kreisförmigen Querschnitt aufweist und die zweite Ummantelung einen nicht-kreisförmigen Querschnitt aufweist.
60. Faser nach Anspruch 6, wobei das Selten-Erd-Dotierungsmaterial Nd, Yb, Er, Er/Yb oder Tm ist.
61. Faserverstärker nach Anspruch 47, ferner mit einer Dispersionskompensationseinrichtung in dem Laserresonator.
62. Faserverstärker nach Anspruch 47, ferner mit einer resonatorinternen Dispersionskompensationseinrichtung zur Kompensation etwa einer Hälfte der positiven Dispersion.
63. Faserverstärker nach Anspruch 51, wobei die innere Ummantelung auf einem Siliziummaterial beruht und der äußere Überzug auf einem Acrylatmaterial beruht.
64. Polarisationshaltefasern mit einem Faserkern, einer ersten den Kern umgebenden Ummantelung, einer zweiten die erste Ummantelung umgebenden Ummantelung, einer dritten die zweite Ummantelung umgebenden Überzug, wobei die erste Ummantelung oder die zweite Ummantelung einen nicht-kreisförmigen Querschnitt aufweist.
65. Faser nach Anspruch 1 oder 64, ferner mit nicht-kreisförmigen Beanspruchungserzeugungsbereichen in der Faser.
66. Faser nach Anspruch 1 oder 64, ferner mit kreisförmigen Beanspruchungserzeugungsbereichen in der Faser.
67. Faser nach Anspruch 64, ferner mit Beanspruchungserzeugungsbereichen in der Faser, wobei der nicht-kreisförmige Querschnitt ein verformtes Sechseck oder ein Polygon mit  $(2n-1)$  Seiten beinhaltet, wobei  $n > 2$  ist.
68. Faser nach einem der Ansprüche 64 bis 67, wobei zumindest der Faserkern mit einem Selten-Erd-Dotierungsmaterial dotiert ist.
69. Optische Faser mit einem Faserkern, der zur Bereitstellung einer optischen Verstärkung dotiert ist, einer ersten den Kern umgebenden Ummantelung mit einem Brechungsindex, der geringer als der des Kerns ist, und einem äußeren Umfang in der Form eines nicht-diametralsymmetrischen Polygons und einer zweiten die erste Ummantelung umgebenden Ummantelung mit einem Brechungsindex, der geringer als der der ersten Ummantelung ist.
70. Optische Faser nach Anspruch 69, wobei das nicht-diametral-symmetrische Polygon ein Fünfeck beinhaltet.
71. Optische Faser nach Anspruch 69, wobei das nicht-diametral-symmetrische Polygon ein Siebeneck beinhaltet.
72. Faserlaser nach Anspruch 69, wobei das nicht-diametral-symmetrische Polygon ein nicht-gleichseitiges Poly-

gon beinhaltet.

73. Optische Faser nach Anspruch 69, wobei das nicht-diametral-symmetrische Polygon ein Polygon beinhaltet, das mit Ausnahme einer einzigen verkürzten oder gereckten Seite gleichseitig ist.

74. Optische Faser nach Anspruch 69, wobei die erste Ummantelung Beanspruchungserzeugungsbereiche beinhaltet.

75. Optische Faser nach Anspruch 74, wobei die Beanspruchungserzeugungsbereiche kreisförmig sind.

76. Optische Faser nach Anspruch 74, wobei die Beanspruchungserzeugungsbereiche nicht kreisförmig sind.

77. Polarisationshaltefaser mit

einem Faserkern,

einer ersten den Kern umgebenden Ummantelung,

einem die erste Ummantelung umgebenden Überzug und

einer Einrichtung zur Minimierung einer Polarisationsmodendispersion in der Faser,

wobei die Faser einen minimalen Faseraußendurchmesser größer als 125 µm aufweist.

78. Polarisationshaltefaser mit

einem Faserkern,

einer ersten den Kern umgebenden Ummantelung,

einer zweiten die erste Ummantelung umgebenden Ummantelung,

einem die zweite Ummantelung umgebenden Überzug,

wobei die erste Ummantelung oder die zweite Ummantelung einen nicht-diametral-symmetrischen Polygonquerschnitt hat.

79. Faser nach Anspruch 69, 77 oder 78, wobei der Kern elliptisch ist.

80. Faser nach Anspruch 69, 77 oder 78, wobei der Kern eine Doppelbrechung zwischen  $1 \times 10^{-6}$  und  $1 \times 10^{-4}$  für die Grundmode hat.

81. Faser nach Anspruch 69 oder 78, wobei der Außendurchmesser der Faser zumindest 125 µm ist.

82. Faser nach Anspruch 77 oder 78, wobei der Überzug aus einem Polymer gebildet ist.

83. Faser nach Anspruch 69, 77 oder 78, wobei zumindest der Faserkern mit einem Selten-Erd-Dotierungsmaterial dotiert ist.

84. Faser nach Anspruch 69, wobei die zweite Ummantelung aus einem Polymer gebildet ist.

Hierzu 11 Seite(n) Zeichnungen

FIG. 1

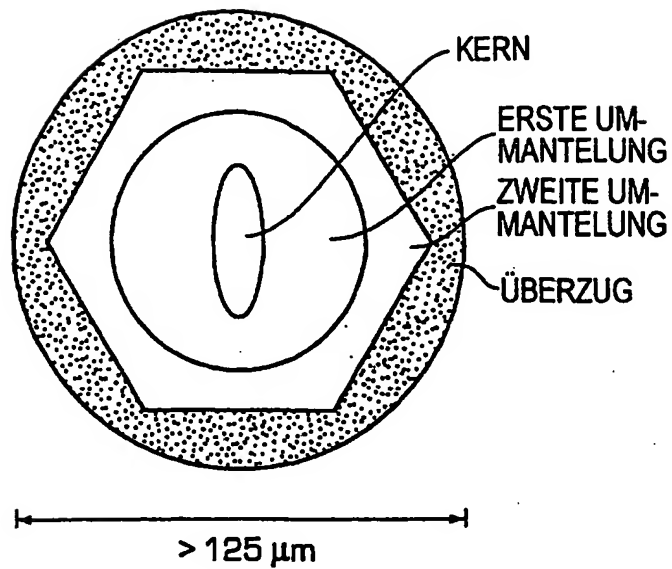


FIG. 2[a]

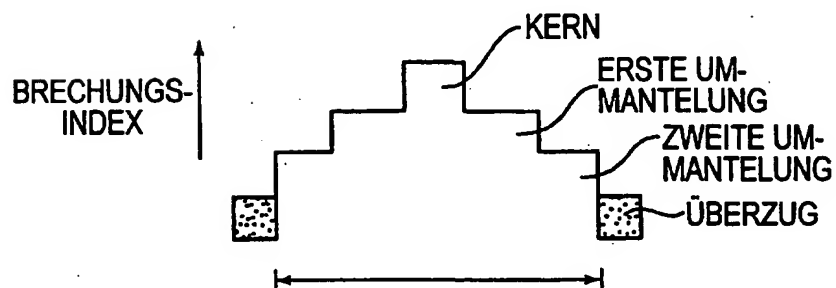


FIG. 2[b]

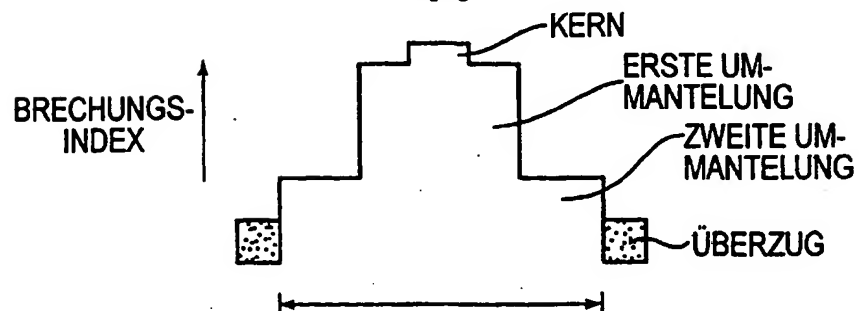


FIG. 3[a]

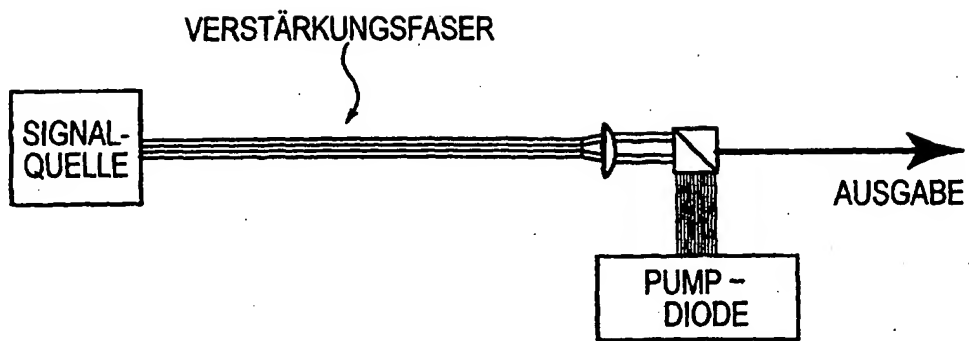
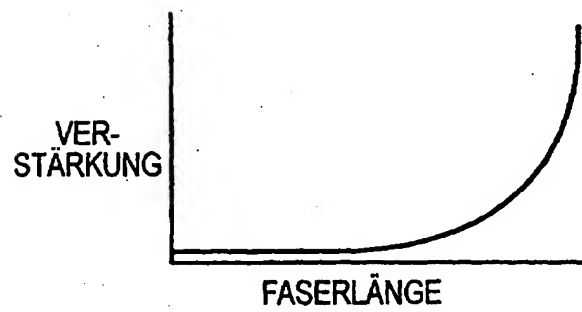


FIG. 3[b]



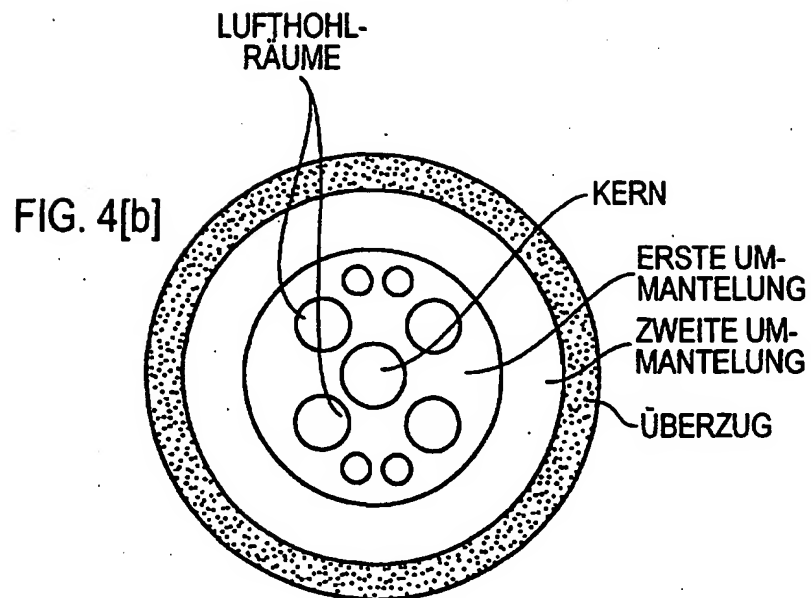
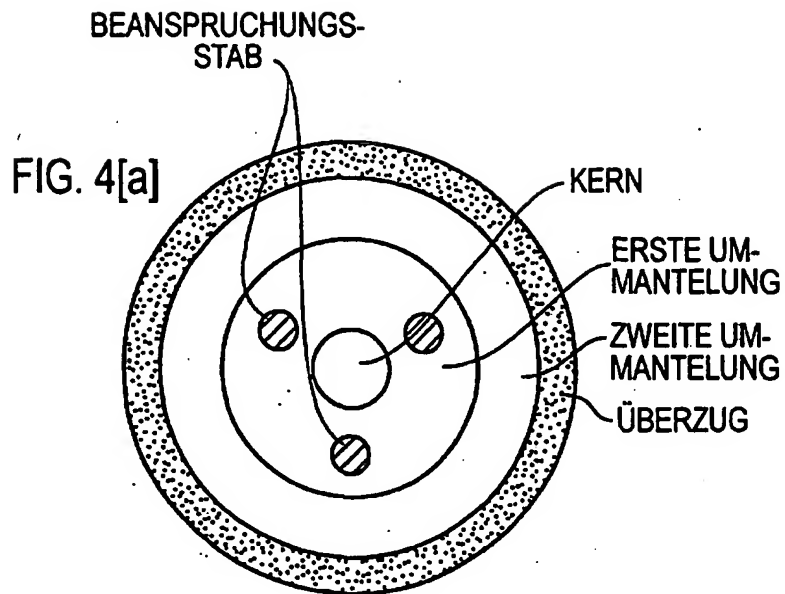


FIG. 5[a]

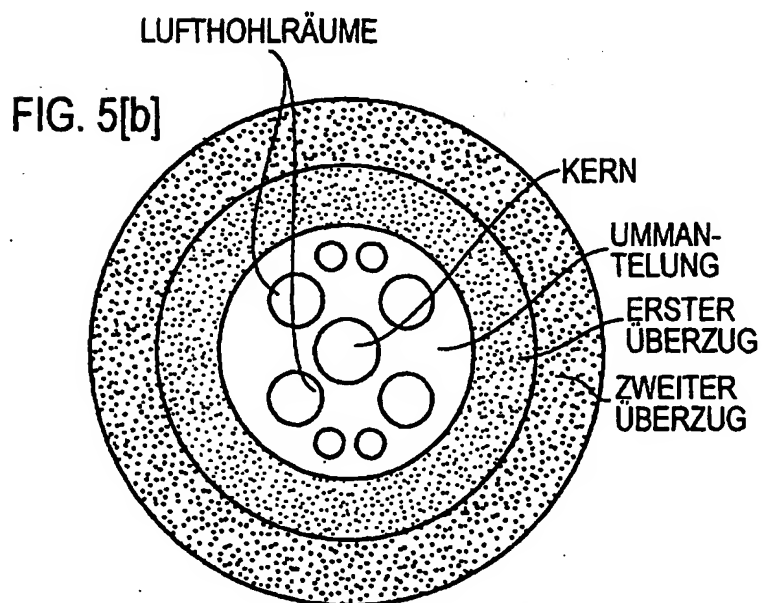
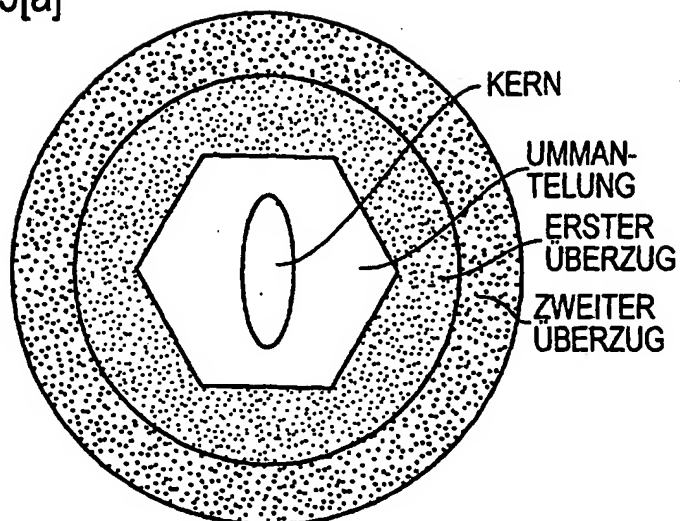




FIG. 6[a]

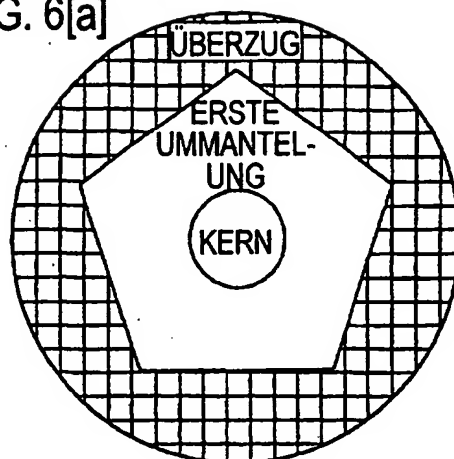


FIG. 6[b]

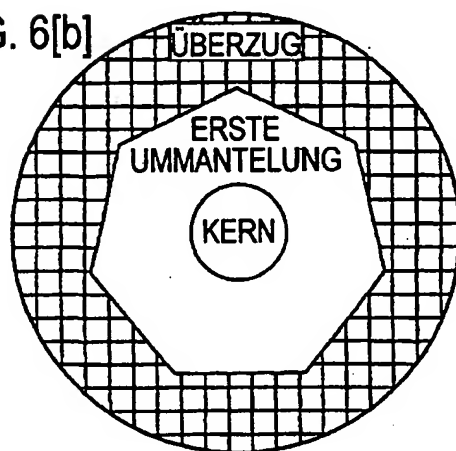


FIG. 6[c]

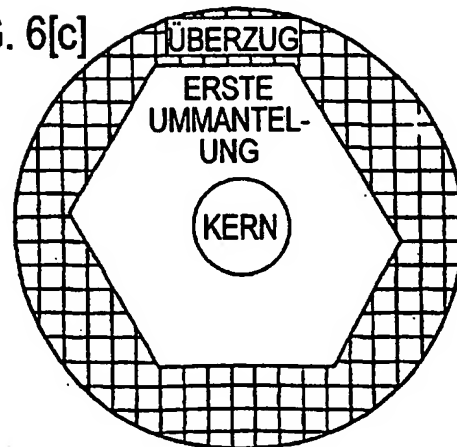


FIG. 7[a]

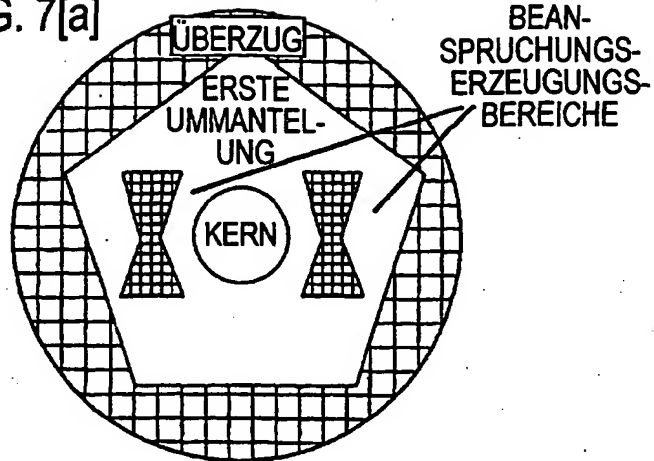


FIG. 7[b]

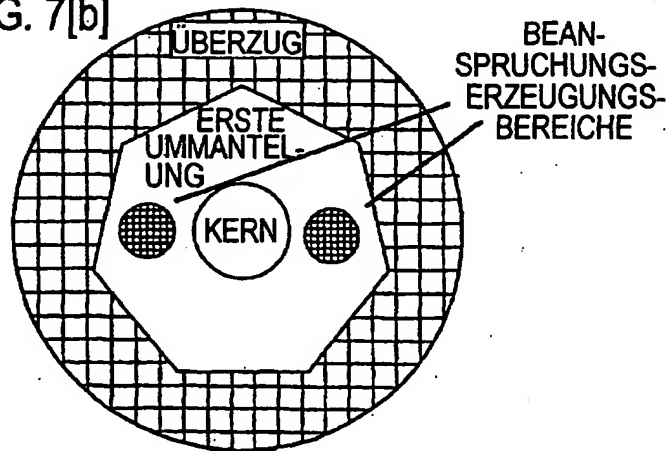


FIG. 7[c]

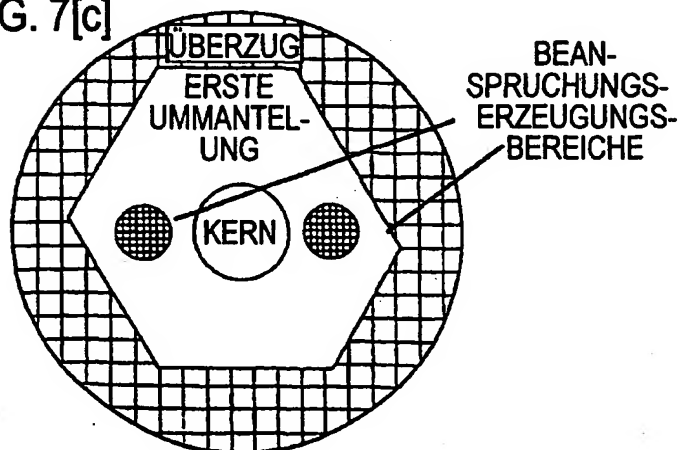


FIG. 8

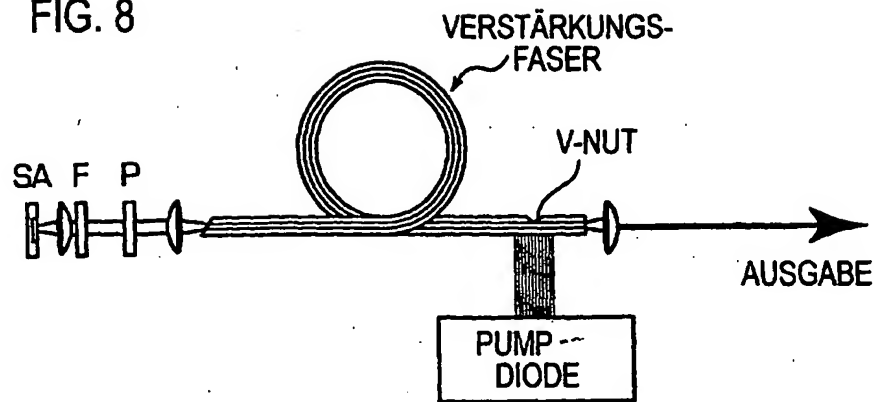


FIG. 9

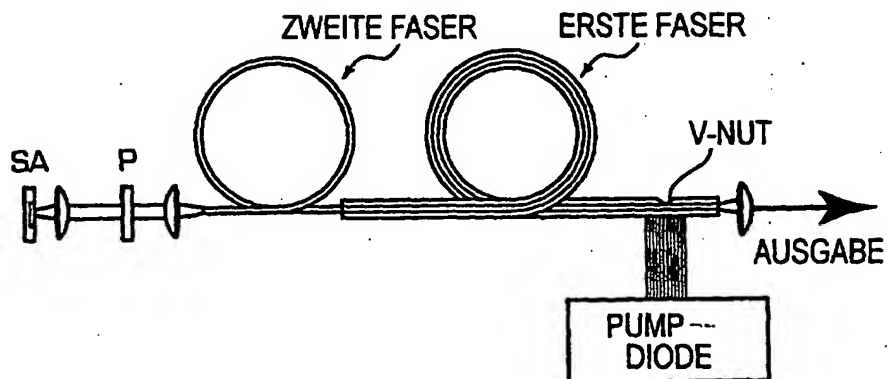


FIG. 10

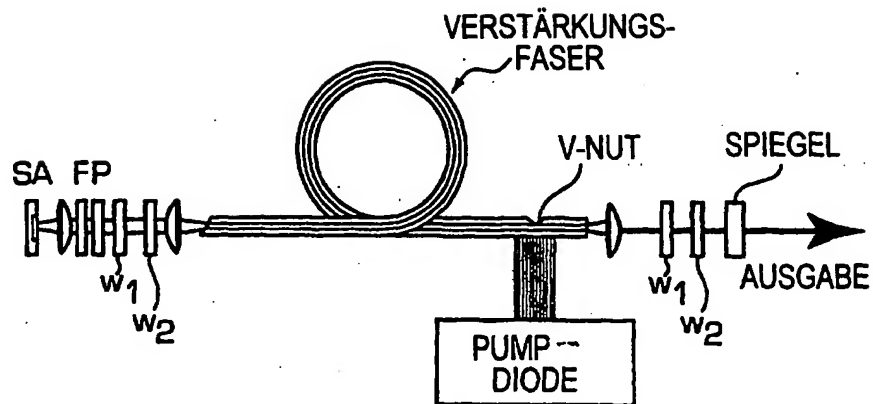


FIG. 11

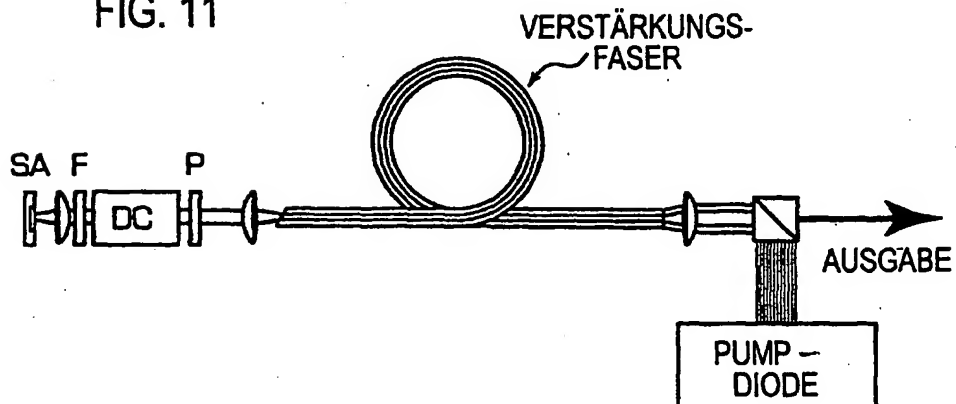


FIG. 12

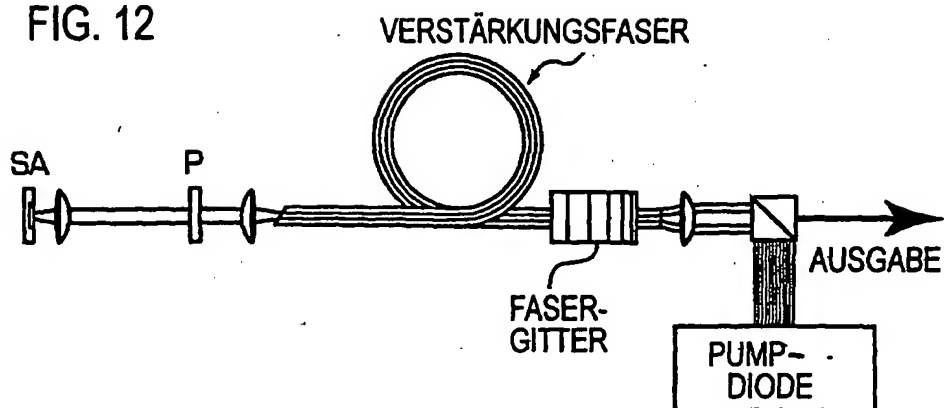


FIG. 13

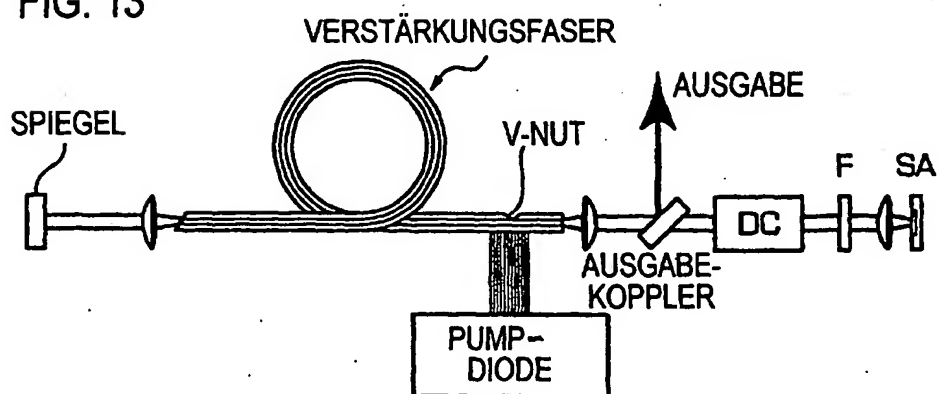


FIG. 14

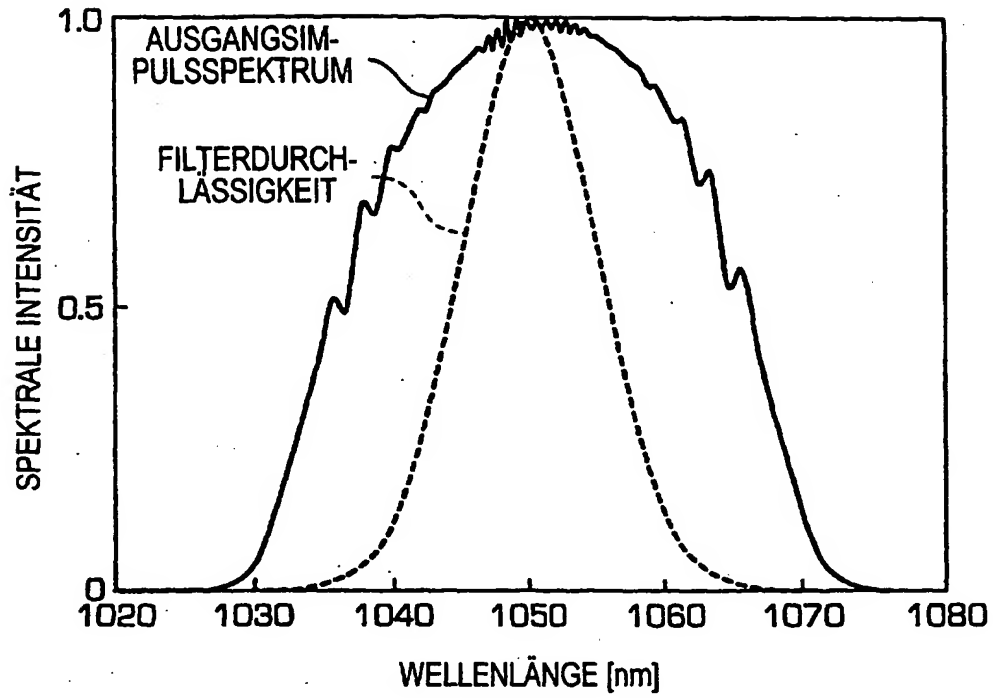


FIG. 15





FIG. 16

